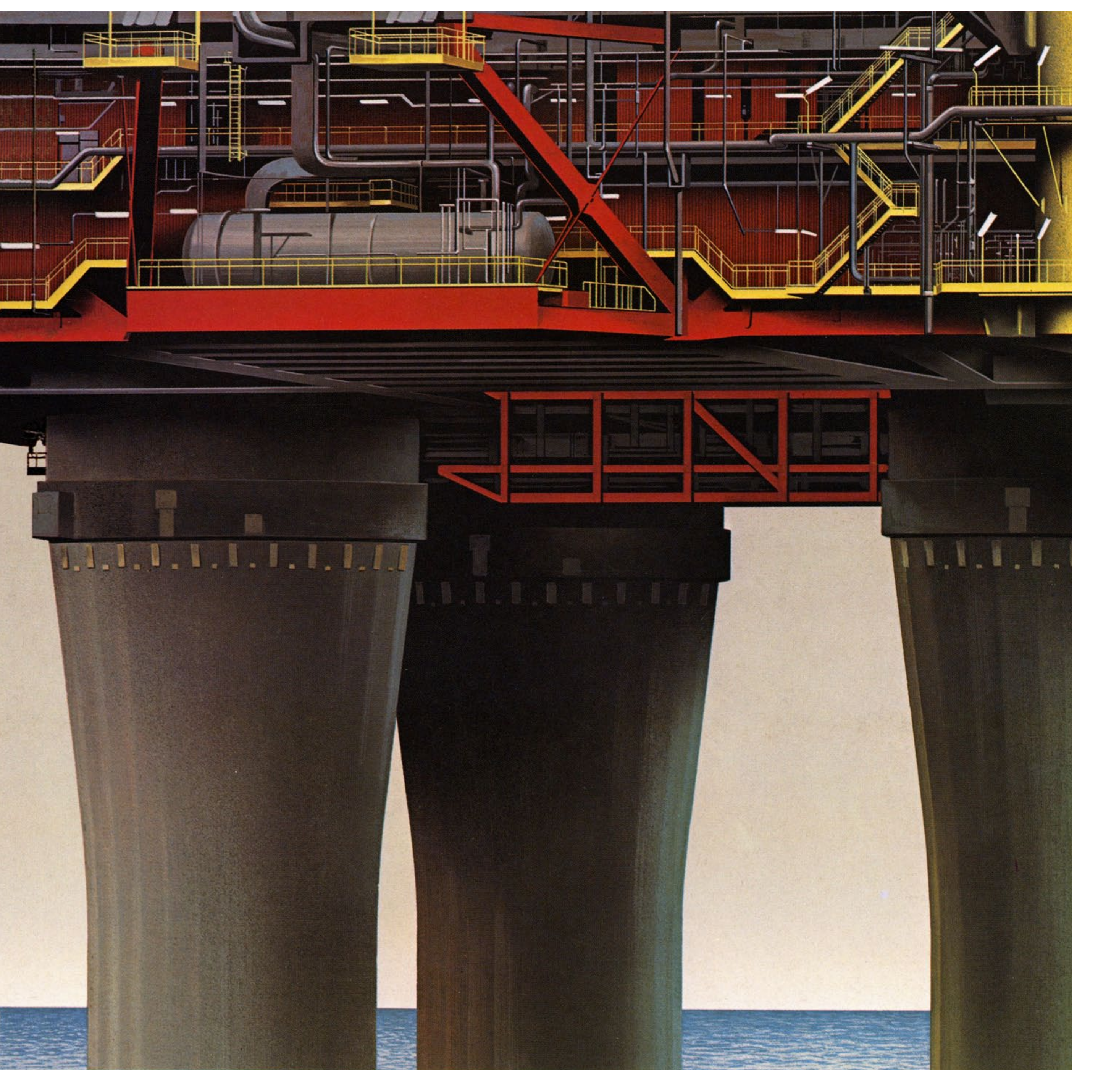
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



PLATAFORMAS PETROLIFERAS

Junio 1982

300 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 69
Junio 1982

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

6 **PLATAFORMAS PETROLIFERAS MARINAS, Fred S. Ellers**
Esas audaces estructuras de la ingeniería desafían oleajes de hasta 30 metros de altura.

20 **ALIMENTOS QUE MODIFICAN LA FUNCION CEREBRAL, Richard J. Wurtman**
Ciertas sustancias que forman parte de la dieta se comportan a veces como medicamentos.

32 **LA ZONA SISMICA DEL MISSISSIPPI, Arch C. Johnston**
Ha sufrido tres de los más violentos temblores que registra la historia de los Estados Unidos.

48 **COMPLEJOS GIGANTES DE NUBES MOLECULARES EN LA GALAXIA, Leo Blitz**
Los objetos de mayor masa de nuestra galaxia constan, casi exclusivamente, de hidrógeno.

60 **EL CALAMAR GIGANTE, Clyde F. E. Roper y Kenneth J. Boss**
Se han estudiado ya bastantes ejemplares de este casi mítico cefalópodo de aguas profundas.

70 **MONOPOLOS MAGNETICOS SUPERPESADOS, Richard A. Carrigan, Jr., y W. Peter Trower.** Si existen, deben ser de gran masa, lentos en su desplazamiento y poco frecuentes.

80 **CROMATINA Y ENSAMBLAJE DEL VIRUS SV 40, Miguel Coca Prados**
Las formas nucleoproteicas de este virus revelan la organización del material hereditario.

90 **LA BREVE VIDA DE ÉVARISTE GALOIS, Tony Rothman**
Cuenta la leyenda que escribió la teoría de grupos la noche antes de su duelo mortal.

3 AUTORES

4 HACE...

44 CIENCIA Y SOCIEDAD

102 TEMAS METAMAGICOS

112 TALLER Y LABORATORIO

120 LIBROS

128 BIBLIOGRAFIA

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR Francisco Gracia Guillén
REDACCION José María Valderas Gallardo (Redactor Jefe)
Carlos Oppenheimer
José María Farré Josa
PRODUCCION César Redondo Zayas
VENTAS Y PUBLICIDAD Elena Sánchez-Fabrés
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

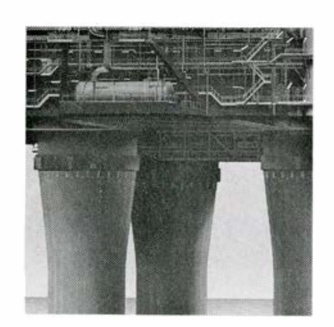
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Gustavo Hernández Espinosa: *Plataformas petrolíferas marinas*; Jesús Palomeque Rico: *Alimentos que modifican la función cerebral*; Miguel Gich Viñas: *La zona sísmica del Mississippi*; Manuel Puigcerver Zanón: *Complejos gigantes de nubes moleculares en la galaxia*; Joandomènec Ros Aragonés: *El calamar gigante*; Pedro Pascual: *Monopolos magnéticos superpesados*; Luis Bou: *La breve vida de Évariste Galois*; Luis Bou: *Temas metamágicos*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Carlos Solís, Julio Samsó, Ramón Margalef y J. F. Pascual-Sánchez



LA PORTADA

La ilustración de la portada muestra parte de una plataforma petrolífera marina del mar del Norte (ver "Plataformas petrolíferas marinas" por Fred S. Ellers, en este mismo número). Esta plataforma, la Statfjord *B*, es el objeto más pesado que haya puesto en movimiento el hombre. Con un peso superior a los 1,2 millones de toneladas, descansa en aguas de 144 metros de profundidad, a 100 millas de las costas de Noruega. Dentro del año en curso, se perforará desde su estructura el primero de los 32 pozos previstos para explotar una reserva que se estima produzca 150.000 barriles de petróleo al día. La plataforma, una vez terminada, habrá costado a sus propietarios (principalmente a la Statoil, compañía nacional de petróleos de Noruega) 1800 millones de dólares. La Statfjord *B* es una plataforma de base gravedad: sus cuatro macizas columnas descansan en una estructura de hormigón en forma de panal sobre el fondo.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 37

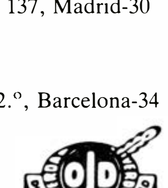
Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 3.300 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 52 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
340 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
440 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º, Barcelona-34
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de portada de Ted Lodigensky

Página	Fuente
6	Norsk Fly og Flyfoto a.s.
8-16	Walken Graphics
17	International Software Services
21	George K. Aghajanian, Universidad de Yale
22-30	Alan D. Iselin
32	NASA
34	Andrew Tomko
35	Servicio Geológico de los EE.UU. EROS Data Center (*arriba*); Andrew Tomko (*abajo*)
36	Andrew Tomko
37	Leon Cash y Susan Nava, Universidad estatal de Memphis
38-41	Andrew Tomko
49	© National Geographic Society-Palomar Sky Survey
50-53	George V. Kelvin
54	William J. Welch y John W. Dreher, Universidad de California
56	Philip M. Solomon, Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook; David B. Sanders y Nicholas Z. Scoville, Universidad de Massachusetts
58	George V. Kelvin
60-62	Tom Prentiss
63	Tom Prentiss (*arriba*); Clyde F. E. Roper, Museo Nacional de Historia Natural (*en medio*); L. L. Robins, de *Animals without Backbones*, de Ralph Buchsbaum (*abajo*)
64	Carla Skinder
68-69	Tom Prentiss
71-77	Ian Worpole
80	Miguel Coca Prados y Ming Ta Hsu
82-85	M. Alonso y Miguel Coca Prados
86	Miguel Coca Prados
87-88	M. Alonso y Miguel Coca Prados
91	David A. Johnson
92	Jean Dubout, cortesía de la Bibliothèque de l'Institut de France
95-98	Ilil Arbel
100	Jean Dubout, cortesía de la Bibliothèque de l'Institut de France
102-108	Donald Byrd, Indiana
109	Cortesía de G. Schirmer, Inc., Nueva York. Frédéric Chopin: *Estudios*, Op. 10, n.º 11; Op. 25, n.os 1, 2, 3, 6 y 12. Edición de Arthur Friedheim. Copyright © 1916 G. Schirmer, Inc. (renovado). Bajo protección del copyright internacional
113-116	Michael Goodman
117	Theodore C. Pickett
118	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

FRED S. ELLERS ("Plataformas petrolíferas marinas") es director de proyectos especiales de la División de Oleoductos de la Bechtel Incorporated. Tras licenciarse por la Universidad estatal de Oklahoma (1940), fue contratado por la Tidewater Associated Oil Company para su departamento de inspección de refinerías. De 1942 a 1946 sirvió en el Pacífico, en el Arma de Ingenieros del ejército estadounidense. Trabajó por primera vez para la Bechtel desde 1946 hasta 1948, principalmente en la explotación de los campos petrolíferos de Arabia Saudita. Ese último año entró en la Arabian American Oil Company (ARAMCO), volviendo, en 1961, a la Bechtel. La mayor parte de su trabajo profesional se ha centrado en distintos aspectos de la ingeniería de la extracción y el transporte de petróleo. Intervino en la explotación de los primeros grandes campos petrolíferos de Abu Dhabi a principios de los años 60 y, más recientemente, en el campo Argyll, en el sector británico del mar del Norte.

RICHARD J. WURTMAN ("Alimentos que modifican la función cerebral") enseña neuroendocrinología en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Comenzó su formación en la Universidad de Pennsylvania, que continuó en la Facultad de Medicina de la Universidad de Harvard, donde se doctoró. Antes de pertenecer al claustro del MIT pasó dos años en el Instituto Nacional de la Salud Mental. Además del tema que desarrolla en su colaboración en este número, ha estudiado la bioquímica de las catecolaminas, acetilcolina, glutamato y la de las hormonas que provocan la menarquia y la ovulación.

ARCH C. JOHNSTON ("La zona sísmica del Mississippi") da clases de geología en la Universidad estatal de Memphis. Dirige el Centro de Información Sísmica de Tennessee. En 1979 se doctoró en geofísica por la Universidad de Colorado en Boulder. Su línea principal de investigación se centra en las causas de los terremotos. Su interés por la geología se le despertó, nos cuenta, durante los largos vuelos realizados sobre los Andes cuando servía en las Fuerzas Aéreas.

LEO BLITZ ("Complejos gigantes de nubes moleculares en la galaxia") es profesor adjunto de astronomía en la Universidad de Maryland en College Park. El primer ciclo de sus estudios universitarios lo realizó en la Universidad de Cornell, licenciándose (1975) y doctorándose (1979) en astronomía por la de Columbia. De 1978 a 1981 fue becario postdoctoral en el Laboratorio de Radioastronomía de la Universidad de California en Berkeley. El año pasado se trasladó a la Universidad de Maryland. Blitz escribe que "ha estado usando las nubes moleculares gigantes como sondas de las porciones exteriores de la Vía Láctea. Este trabajo ha demostrado que la Vía Láctea tiene una masa mucho mayor de lo que se había supuesto y que una gran parte de esa masa se encuentra probablemente en una forma todavía desconocida".

CLYDE F. E. ROPER y KENNETH J. BOSS ("El calamar gigante") son zoólogos especializados en anatomía y clasificación de animales marinos. Roper dirige el departamento de zoología de invertebrados del Museo Nacional de Historia Natural de la Institución Smithsoniana. Diplomado por la Universidad de Transylvania en 1959, se licenció y doctoró por la de Miami. En 1966 se incorporó al equipo del Museo Nacional, del que llegó a ser conservador, en 1972, y director del departamento de zoología de invertebrados, en 1980. Boss enseña biología en la Universidad de Harvard, labor que simultanea con la de conservador de la sección de malacología (el estudio de los moluscos) del Museo de Zoología Comparada del Harvard College. Se diplomó en 1957 por el Central Michigan College, licenciándose en ciencias en 1959 por la Universidad estatal de Michigan. Es doctor por Harvard (1963). Trabajó en un laboratorio de la Oficina de Pesquerías Comerciales de la Institución Smithsoniana. Entró en Harvard en 1966 como conservador adjunto del Museo de Zoología Comparada; en 1970 recibió el nombramiento de profesor de biología. "Padezco, nos escribe, lo que creo que [Lawrence] Durrell llamó islomanía, una pasión insólita por la evasión y el aislamiento que ofrecen las islas; con este fin poseo una vieja casa de pescadores repleta de libros... en una isla del golfo de Maine... Allí fue donde Clyde y yo nos entusiasmamos ante la posibilidad de escribir un artículo sobre *Architeuthis* [el calamar gigante]".

RICHARD A. CARRIGAN, Jr., y W. PETER TROWER ("Monopolos magnéticos superpesados") trabajan en el campo de la física que se ha empeñado en la búsqueda de pruebas experimentales que confirmen la existencia de monopolos. Carrigan realizó sus estudios superiores en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, en cuya facultad recibió el doctorado en 1962. Estuvo trabajando de investigador en el Instituto Carnegie de Tecnología, convirtiéndose luego en docente del mismo durante cuatro años (1964-1968). Se trasladó al Fermi National Accelerator Laboratory, y allí ocuparía el cargo de director adjunto de la división de investigación. Trower enseña física en el Instituto Politécnico de Virginia. Procede de la Universidad de Illinois, donde se doctoró en 1966. Además de su interés por los monopolos, Carrigan y Trower prosiguen investigando en el dominio de las partículas elementales, cuya existencia sí goza de pruebas suficientes.

MIGUEL COCA PRADOS ("Cromatina y ensamblaje del virus SV40") se graduó en ciencias biológicas por la Universidad de Salamanca. Realizó estudios de doctorado sobre cultivos tumorales *in vitro* en el laboratorio de virología del centro de Edafología y Biología Aplicada del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en Salamanca. Posteriormente, en la Universidad estatal de Ohio, trabajó en la citopatología del virus de la polio. Pasó varios años como miembro del grupo que dirigía James E. Darnell en la Universidad Rockefeller de Nueva York, donde estudió el metabolismo del virus SV40. Enseña en la Universidad de Yale.

TONY ROTHMAN ("La breve vida de Évariste Galois") se encuentra en el departamento de astrofísica de la Universidad de Oxford, disfrutando de una beca. Tras licenciarse, en 1975, por el Swarthmore College, se doctoró en física por la Universidad de Texas en Austin, en 1981. Sus campos de investigación son, principalmente, el estudio de los agujeros negros, la formación de bariones en los comienzos de la historia del universo y la síntesis primordial de núcleos atómicos en las estrellas. "En realidad, mi interés por Galois es consecuencia de una obra teatral... que escribí hace algunos años, sobre el poeta ruso Pushkin y sobre Galois. Durante la preparación histórica descubrí que las narraciones habituales de la vida de Galois disponibles en inglés eran, cuando menos, inexactas."

Hace...

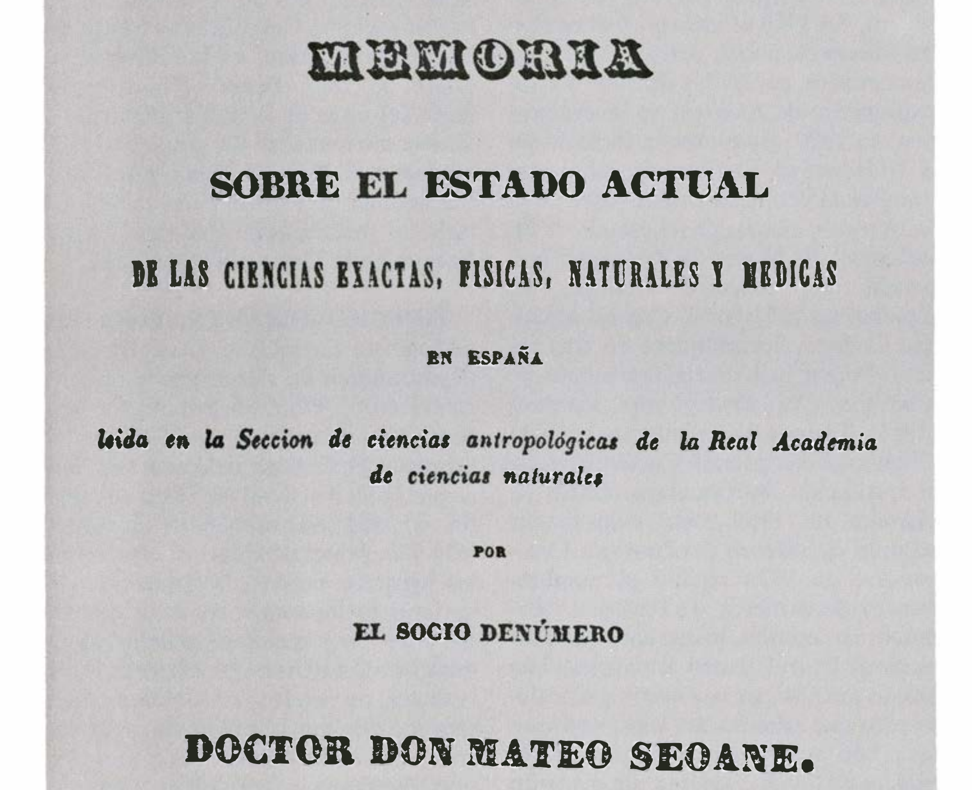
José M.ª López Piñero

... ciento cincuenta años

Mateo Seoane Sobral publicó en Londres su *Informe acerca de los principales fenómenos observados en la propagación del cólera indiano por Inglaterra y Escocia*, principal aportación española a la primera literatura europea en torno al cólera morbo asiático. Las circunstancias en las que apareció este libro y, sobre todo, las contradictorias relaciones que con motivo de la epidemia mantuvo el gobierno de Fernando VII con su autor, que era un sobresaliente exiliado político, reflejan el grave desquiciamiento que padecía la actividad científica española de la época.

Seoane había nacido en Valladolid en 1791. Estudió medicina en las Universidades de Valladolid y Salamanca, obteniendo en esta última el título de licenciado (1812) y el de doctor (1813). Inició una prometedora carrera de profesor universitario que quedó truncada por una real orden de Fernando VII, en junio de 1814, que le declaró incapacitado para desempeñar puestos docentes, desterrándole de Madrid, sitios reales, Salamanca y Valladolid. La razón fue ser "un joven muy aventajado, pero completísimamente contagiado del liberalismo y, por sus buenas cualidades, extraordinariamente peligroso". En consecuencia, tuvo que convertirse en médico rural y ejerció durante seis años en las localidades vallisoletanas de Rueda y La Seca, desde las que participó en las conspiraciones dirigidas hasta 1820 contra el régimen absolutista. Durante el trienio liberal se convirtió en una figura muy destacada de los llamados "exaltados". Fue elegido diputado y trabajó con intensidad en varias comisiones de las Cortes. Fue el principal responsable del Proyecto de Código sanitario de 1822 que, aunque no llegó a aprobarse, pesó notablemente en la posterior organización de la sanidad española, sobre todo en lo que respecta a la higiene pública. Notable fue también su contribución al estudio de los problemas de la sanidad militar, así como de la asistencia médica a los pobres de acuerdo con una concepción secularizada de la beneficencia. Por otra parte, destacó por su enfrentamiento personal con Fernando VII. En 1823, desmintió como médico que una supuesta gota impidiera al monarca trasladarse de Madrid a Sevilla, como querían las Cortes, y poco más tarde fue de los diputados que votaron la suspensión de la potestad regia.

No resulta nada extraño que, restaurado el régimen absolutista, fuera condenado a muerte y tuviera que exiliarse. En octubre del mismo 1823 se refugió en Tánger, donde ejerció algún tiempo la profesión y, tras breves estancias en Gibraltar, y la ciudad irlandesa de Cork, se trasladó a Londres. En la capital británica permaneció durante una década, convirtiéndose en una de las personalidades más brillantes del exilio intelectual y científico español. Aprendió a fondo el idioma inglés y perfeccionó su formación científica junto a figuras como Michael Faraday, así como su preparación médica, principalmente en el Guy's Hospital. Pudo, de esta forma, integrarse plenamente en el ambiente médico londinense, llegando a ser miembro numerario de las principales asociaciones profesionales, médico titular en el St. Georges' Hospital y colaborador del Central Board of Health británico. Desplegó, al mismo tiempo, una intensa actividad de publicista. Desde 1828 hasta 1834, fue uno de los principales redactores del semanario científico y literario *The Atheneum*. Publicó varios trabajos en revistas médicas inglesas (1827-1831), así como un diccionario inglés-español (1830) que fue luego numerosas veces reeditado. Con destino a su venta en América, tradujo varios libros médicos y escribió en castellano para el editor Rudolph Ackermann una serie de nueve manuales (1828), todos ellos dedicados a ciencias físicas, químicas y naturales, con la excepción de uno consagrado a la higiene pública. No obstante, sus principales publicaciones en este período estuvieron relacionadas con el cólera. Ante la amenaza de lo que sería la primera epidemia que afectó a Europa, el gobierno español acudió a Londres en busca de expertos que le proporcionaran información. Tanto el Central Board of Health como el gran higienista Neil Arnott recomendaron al embajador que recurriese a Seoane. De


MEMORIA

SOBRE EL ESTADO ACTUAL

DE LAS CIENCIAS EXACTAS, FISICAS, NATURALES Y MEDICAS

EN ESPAÑA

leida en la Seccion de ciencias antropológicas de la Real Academia de ciencias naturales

POR

EL SOCIO DE NÚMERO

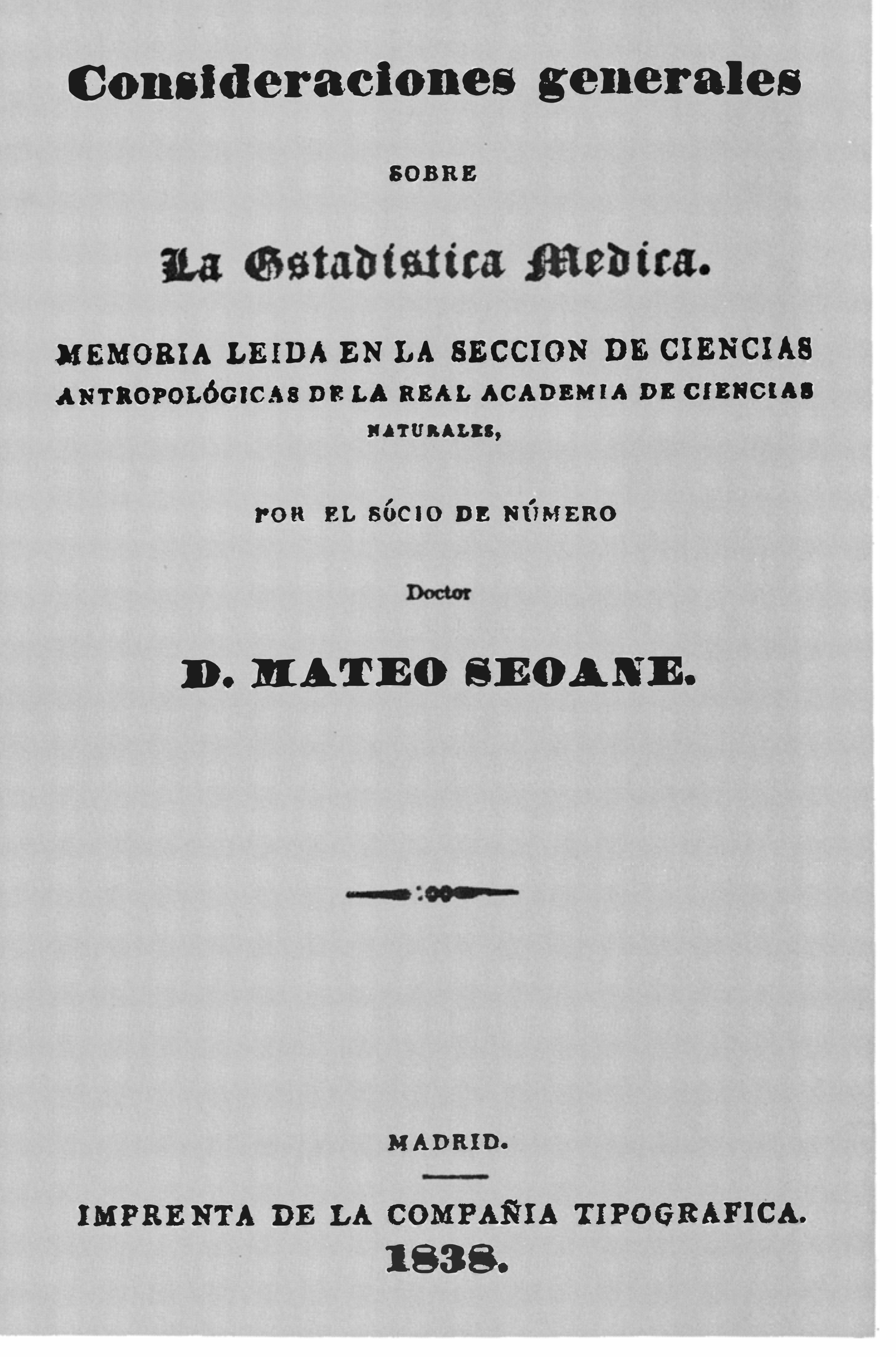
DOCTOR DON MATEO SEOANE.

En su **Memoria** *de 1842, Seoane ofreció una lúcida y amarga revisión acerca de la trayectoria regresiva de la actividad científica española*

esta forma, el gobierno absolutista, que todavía tenía condenado a muerte al médico vallisoletano, publicó en Madrid, en 1831, su versión castellana anotada de los documentos relativos al cólera reunidos por el Board of Health, que poco después sería retraducida al portugués. Al año siguiente, apareció en Londres su *Informe* antes citado y en 1834, de nuevo en Madrid, sus *Instrucciones generales sobre el modo de preservarse del cólera-morbo epidémico.*

Seoane se negó a aceptar el indulto personal que, como recompensa a sus servicios, le ofreció el último gobierno absolutista. En 1834, sin embargo, se acogió a la amnistía destinada a los liberales y volvió a Madrid. Muy pronto se convirtió en la personalidad de mayor prestigio en lo que respecta a la organización de la profesión y la enseñanza médicas y, sobre todo, de la asistencia y la higiene pública, desde los supuestos liberales. Anotemos únicamente que pesó decisivamente en la creación del cuerpo de sanidad militar (1836), en la parte correspondiente a medicina del plan general de estudios de 1845 y en la ley orgánica de sanidad de 1855. Fue, primero, vocal de la Junta Suprema de Sanidad y luego, desde su fundación en 1845, del Consejo de Sanidad del Reino. Influyó de modo directo en los principales cultivadores españoles de la higiene pública de la generación siguiente, en especial Pedro Felipe Monlau y Francisco Méndez Alvaro.

Hasta mediados de siglo, publicó numerosos artículos en diferentes revistas médicas madrileñas, así como varias memorias, entre las que destacan las tituladas *Consideraciones generales sobre la estadística médica* (1838) y *Memoria sobre el estado actual de las ciencias exactas, físicas, naturales y médicas en España* (1842). La primera debe ser considerada como el texto inaugural de la materia en nuestro país. Conociendo a fondo el panorama europeo, Seoane juzga que la estadística médica es una disciplina naciente, que está todavía "muy lejos de haber hecho los progresos que serían de desear", y examina su papel en la investigación biomédica básica, en la fundamentación de la práctica clínica y terapéutica y en los estudios medicosociales. Llega a decir que "el ejercicio de la medicina no es más que una continua y más o menos acertada aplicación del cálculo de las probabilidades a un caso dado" y, por otra parte, se ocupa de la organización de la recogida de datos estadísticos y de la calamitosa situación española en este terreno. La segunda de las memorias citadas es una lúcida revisión de la trayectoria regresiva que la actividad científica había atravesado en España durante el reinado de Fernando VII. Su conclusión cara al presente es muy amarga: "¿Se ha cambiado esta situación en los ocho años del actual reinado? ¿presenta nuestro estado actual la lisonjera perspectiva que relativamente a las ciencias exactas y de observación ofrecía España hace cuarenta años? ¿El amor al estudio de estas ciencias está tan vivo y extendido como estaba en aquella época y las mira el gobierno con la predilección que las miraba entonces?.. Por desgracia, el mal es tan patente, son tan sensibles sus efectos y es tan preciso exaltar la imaginación hasta los espacios imaginarios para fundar en lo presente algunas esperanzas de un porvenir lisonjero, que nada creo aventurar cuando supongo nuestro estado actual como un estado de gran decadencia".


Consideraciones generales

SOBRE

La Estadística Medica.

MEMORIA LEIDA EN LA SECCION DE CIENCIAS ANTROPOLÓGICAS DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS NATURALES,

POR EL SÓCIO DE NÚMERO

Doctor

D. MATEO SEOANE.

MADRID.

IMPRENTA DE LA COMPAÑIA TIPOGRAFICA.

1838.

Portada de la memoria de Seoane sobre la estadística médica, punto de partida de esta disciplina en España



PLATAFORMA PETROLIFERA STATFJORD "B", la estructura de mayor peso que jamás arrastrara el hombre, saliendo remolcada del Stavangerfjord, Noruega, el mes de agosto de 1981. La estructura, que desplazaba un peso de 899.000 toneladas al ser remolcada hasta su lugar de emplazamiento, se instaló en aguas de 144 metros de profundidad, en el campo petrolífero de Statfjord, a 100 millas de la costa noruega. Su inmensa mole resiste las tormentas del mar del Norte. La Statfjord *B* proporciona alojamiento a una tripulación de 200 hombres en una estructura de ocho pisos de altura, con dos alas de siete pisos. Se invirtieron más de 11.000 años-hombre en esta plataforma, que entró en servicio en abril y cuyo valor es de 1800 millones de dólares.

Plataformas petrolíferas marinas

Asentar estructuras que resistan los embates de olas de hasta 30 metros de altura en aguas de 180 metros de profundidad exige la aplicación de una ingeniería audaz así como una elevada inversión de capital

Fred S. Ellers

A lo largo de los últimos doce años se han multiplicado por diez el tamaño, la complejidad técnica y el coste de las plataformas petrolíferas marinas. Unos 12,5 millones de barriles diarios, que suponen el 22 por ciento del petróleo mundial, afloran a las cabezas de pozos apuntalados por estructuras rodeadas de agua, muchas de las cuales no llegan a divisarse desde tierra firme. Varias de las primeras plataformas se levantaron en aguas de profundidad media, así las del golfo de México, y en lagos, como el Maracaibo venezolano; ni un punto ni otro planteaban problemas técnicos especiales. Pero con el descubrimiento de importantes campos petrolíferos en el mar del Norte, entre Gran Bretaña y Europa continental, hubo que fijar las plataformas en suelos marinos de hasta 152 metros de profundidad, capaces de resistir, además, el embate de olas que alcanzan los 30 metros de altura.

El año pasado se instaló la estructura más pesada que jamás transportara el hombre: una plataforma marina de 271 metros de altura y 899.000 toneladas de desplazamiento. Se trata de la Statfjord *B*, que descansa sobre aguas de 144 metros de profundidad a 160 kilómetros de la costa noruega. En el transcurso de este año se perforará, desde la estructura, el primero de los 32 pozos que habrán de explotar un yacimiento destinado a rendir 150.000 barriles diarios, si se cumplen los pronósticos. El coste de la plataforma, una vez terminada, se cifra en 180.000 millones de dólares que gravarán sobre todo las arcas de la Statoil, empresa nacional de petróleos de Noruega. Para colaborar en la construcción de semejantes estructuras se diseñaron barcazas-grúa semisumergibles que pudieran levantar 5000 toneladas, lo que venía a pesar un destructor de la segunda guerra mundial, hasta una altura de 60 metros por encima del agua en pleno océano.

Para hacernos una idea más cabal de las innovaciones tecnológicas que posibilitan la instalación de plataformas en medios marinos hostiles, a profundidades cada vez mayores, expondré con cierto detenimiento de qué consta la Statfjord *B* y tres tipos más de estructuras. Así entenderemos mejor las posibilidades de que dispone la industria del petróleo en su expansión hacia nuevos yacimientos submarinos. Además de la plataforma noruega citada, me ocuparé, pues, de la Magnus y la Hutton, ambas en el sector británico del mar del Norte, y de la Block 280, en el golfo de México. La plataforma Magnus, la más convencional de las cuatro, descansará sobre cuatro columnas de acero sujetas al fondo del mar por medio de pilotes. La plataforma flotante Hutton se afirmará al fondo a través de tubos de acero verticales, ligados a cada una de sus esquinas, que permanecerán en tensión bajo cualquier condición meteorológica y de funcionamiento. Podríamos describir la plataforma Block 280 como una torre arriostrada: una ligera armadura de acero mantenida en posición vertical por medio de una formación radial de 20 cables anclados, en aguas de 300 metros de profundidad. La Statfjord *B* entró en funcionamiento en abril; las tres restantes habrán de instalarse a lo largo de los dos próximos años.

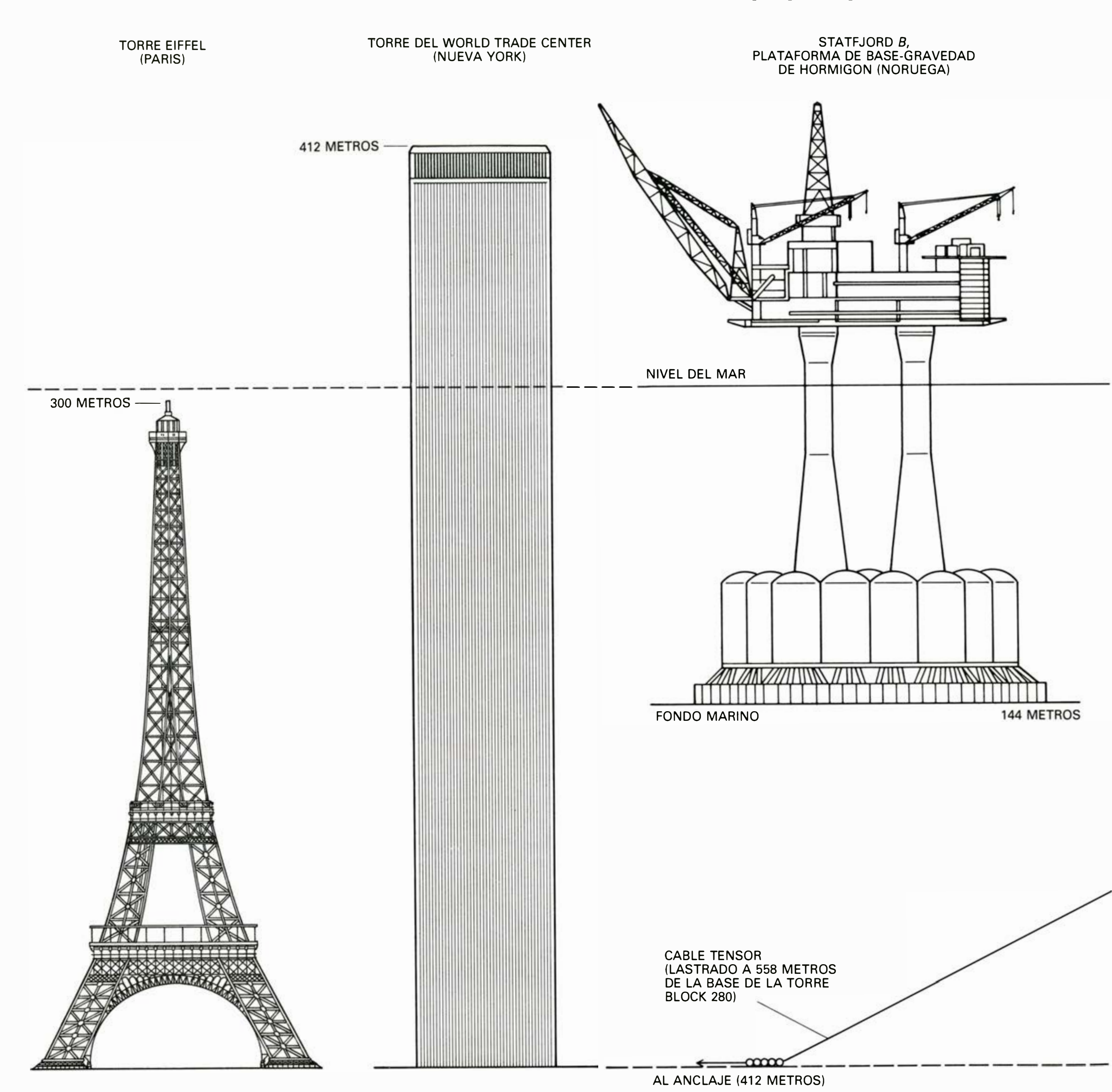
La búsqueda de gas y petróleo bajo las profundidades a las que operarán las estructuras mencionadas corrió a cargo de equipos flotantes de perforación, provisionales, de dos tipos: buques de sondeo y equipos de perforación semisumergibles. Una vez localizados los depósitos de interés económico, las compañías petrolíferas hubieron de hacer frente al problema que les planteaba el diseño de plataformas estables que rindieran el máximo, en la extracción del petróleo y gas almacenados, durante el tiempo de vida económico del yacimiento, cifrado en muchos casos sobre los 20 años o más. Desde esos armazones permanentes, pueden perforarse pozos a distintos ángulos en relación con la vertical de la estructura, que permiten explotar el depósito a lo largo y a lo ancho de una superficie submarina de unos 10 kilómetros cuadrados. Según sea el espesor de la capa rocosa donde se aloja el petróleo, desde una plataforma pueden abrirse hasta 30 pozos o más para extraer los hidrocarburos. Pueden perforarse también otros pozos a través de los cuales se reinyecte el gas que se saca con el petróleo o se inyecte agua, al objeto de mantener la presión a que se encuentra el yacimiento.

Las plataformas marinas constan, fundamentalmente, de dos secciones componentes: (1) equipos de perforación y funcionamiento (que suelen designarse con su nombre técnico inglés "topsides") y (2) el armazón, es decir, las estructuras de soporte y cimientos. La primera sección componente comprende, entre otros, los equipos de sondeo, de procesado del petróleo y el gas, bombas de trasiego, servicios y alojamiento con capacidad para 300 trabajadores. Todas las grandes plataformas disponen ya de helipuerto. El petróleo procesado se bombea a tierra directamente a través de un oleoducto submarino o bien se almacena hasta que lo recoja un buque cisterna. En el segundo caso, se acostumbra a prever suficiente capacidad de almacenaje para que los buques cisterna carguen intermitentemente sin tener que reducir el caudal de los pozos.

Los elementos integrantes de la primera sección componente, en las cuatro plataformas seleccionadas aquí, pesan de 16.000 a 40.000 toneladas y tienen una superficie total de planta de 7000 a 37.000 metros cuadrados, destinada en su mayor parte al alojamiento de la tripulación. Esas ingentes superestructuras deben situarse por encima de la tripulación. Esas ingentes superestructuras deben situarse por encima supone que, en el caso del mar del Norte, hay que situar el fondo de la cubier-

ta más baja arriba de los 24,5 metros sobre el nivel medio del mar.

La segunda sección componente de una plataforma marina es el armazón o estructura de soporte. En su diseño ha habido que afinar mucho más el ingenio. Esas estructuras han de proteger a la primera componente de la agresión de los vientos, oleaje, corrientes marinas y, en algún caso que otro, movimientos sísmicos. Pero la mayoría de las veces las fuerzas ambientales más violentas de las que hay que defenderse son las originadas por los embates de las olas. (Merece subrayarse la excepción de las estructuras que se levanten a lo largo de la costa oeste de los Estados Unidos, donde las fuerzas sísmicas son las más preocupantes.) A la hora de proyectar la plataforma los ingenieros cuentan con dos condiciones principales de oleaje. La primera es la mayor ola que pueda presentarse, una sola



ESQUEMA COMPARATIVO de cuatro plataformas petrolíferas marinas con dos edificios en tierra firme, cuya altura se toma de referencia: La Torre Eiffel, terminada en 1889, y una de las torres neoyorquinas del World Trade Center. Desde el punto de vista de las condiciones ambientales, la comparación carece de sentido. Las construcciones en tierra firme se hallan sometidas a la acción de fuerzas laterales no superiores a las que ejercen los vientos. Las torres marinas deben soportar, por contra, la embestida de olas de hasta 30 metros de altura. Tres de las plataformas explotarán campos petrolíferos vecinos situados en el mar del Norte. La Statfjord *B* descansa sobre cuatro grandes columnas de hormigón, con depósitos de almacenamiento en la base. Debido a que su estabilidad depende únicamente de su propia masa, se la describe como plataforma de base gravedad. Desde 1970 se han construido más de 20 de estas estructuras de base por gravedad. La base de la plataforma Magnus, conocida por camisa de acero ("steel-template jacket") es la más pesada de los modelos de su tipo: pesará 41.000 toneladas. De las cuatro columnas en que se asienta la plataforma, dos estarán dotadas de cámaras de flotación. En el año curso podrá flotarse la estructura y acarrearse hasta su destino en el sector del Reino Unido del mar del Norte, a unas 25 millas al

vez, durante el intervalo que se mantenga en actividad la estructura. Esa ola hipotética determina la resistencia máxima de la plataforma. La segunda condición es el efecto acumulativo de varios millones de olas al año cuyo período coincide con la frecuencia de oscilación fundamental de la propia plataforma. Aunque se trata de fuerzas de resonancia pequeñas si las consideramos una a una, la estructura las amplifica dinámicamente; determinan, por tanto, los tiempos de vida en cuanto a la fatiga que debe recoger el diseño del proyecto.

La estructura de soporte ha de tener, por último, una segura cimentación. La debida afirmación exige a veces, en suelos de fondos marinos blandos sobre todo, clavar pilotes hasta 150 metros más abajo. Lo que supone una longitud total de pilote, sumado el embutidor entre pilote y martinete por encima del agua, superior a los 300 metros, que,

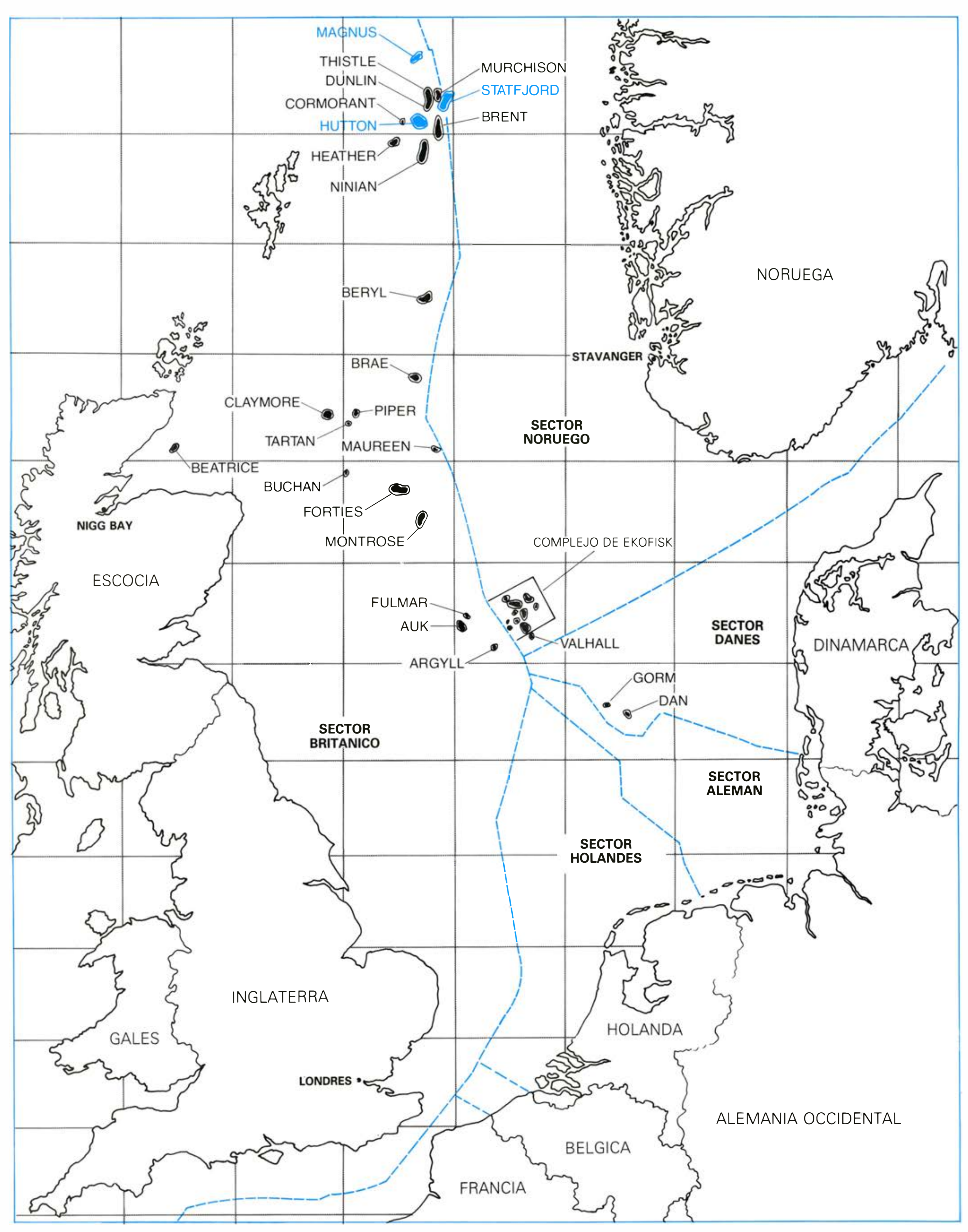
MAGNUS,
PLATAFORMA DE CAMISA DE ACERO
(REINO UNIDO)

HUTTON,
PLATAFORMA DE PATAS EN TENSION
(REINO UNIDO)

BLOCK 280,
TORRE ARRIOSTRADA
(ESTADOS UNIDOS)

NIVEL DEL MAR
CABLE TENSOR
(20 EN TOTAL)
FONDO MARINO
148
METROS
FONDO MARINO
186
METROS
FONDO MARINO
305 METROS

norte de la Statfjord *B* y a 250 del nordeste de la costa escocesa. La torre se anclará entonces al fondo por medio de pilotes. La estructura Hutton, una plataforma de las llamadas de patas en tensión, consistirá en un casco flotante encadenado al fondo del mar por ligeros tubos de acero en sus cuatro esquinas. Esta unidad, la primera de su tipo, se remolcará el año que viene hasta el campo Hutton, en el sector británico del mar del Norte, a unas 15 millas al suroeste de la Statfjord *B*. La cuarta de las plataformas, también la primera de su tipo, es la torre arriostrada Block 280. Operará en el golfo de México, en aguas de 305 metros de profundidad. Estará fijada al fondo del mar por 20 cables de acero en disposición parecida a la de los radios de una rueda. La longitud de cada cable es superior a los 900 metros. La torre y sus tensores pesarán 43.000 toneladas, poco más que la Magnus de camisa de acero y el cuádruple que la Torre Eiffel. La Magnus será, de las cuatro plataformas, la más cara, con un coste estimado de unos 2600 millones de dólares, dos veces y medio lo que se invirtió en todo el complejo World Trade Center, que consta de dos torres de 110 plantas y cuatro edificios menores. Cada torre del World Trade Center tiene un peso muerto de 325.000 toneladas, lo que representa un poco más que un tercio del desplazamiento de la plataforma Statfjord *B*.



PRINCIPALES CAMPOS PETROLIFEROS del mar del Norte. Se encuentran en sectores asignados a dos países: Reino Unido y Noruega. El gas se descubrió en el sector del Reino Unido en 1965. Cuatro años más tarde se identificó el primer yacimiento importante de petróleo en Ekofisk, en el sector noruego. En 1972, se localizaron gigantescos campos de petróleo con reservas recuperables de más de 500 millones de barriles, en ambos sectores. Dinamarca tiene también dos pequeños campos. En veintiuno de los 27 yacimientos reseñados en este mapa, fluye petróleo continuamente a razón de 2,4 millones de barriles por día. Los tres campos cuyos diseños de plataformas se han descrito en las ilustraciones precedentes, están situados a menos de 25 millas, uno de otro, a unos 61 grados de latitud Norte, en la divisoria entre el sector británico y el noruego. De los tres, el Statfjord fue el primer campo en explotarse (en noviembre de 1979) desde un pequeño prototipo de la plataforma Statfjord *B*. La plataforma del campo Magnus empezará a rendir, si no cambia el proyecto, el año que viene. La plataforma de patas en tensión Hutton entrará en funcionamiento en 1984. Ilustración de Walken Graphics.

traducidos en peso de material, significa el manejo en bloque de cientos de toneladas.

Las primeras estructuras estables fuera del alcance de la vista desde tierra firme, destinadas a la perforación y explotación petrolífera, se instalaron el año 1947 ante las costas de Lousiana. Consistían en una serie de armaduras de acero que se fabricaron en la costa, y se transportaron hasta su emplazamiento por barcazas y allí las armaron barcas grúa. Se fijaron sobre el fondo marino con pilotes clavados a través de manguitos de acero que formaban parte de la estructura. Las estructuras así afirmadas al fondo pasaron a conocerse como blindajes de acero ("steel-template jackets").

Desde el año 1947 hasta mediada la década de los 70, casi todas las plataformas petrolíferas marinas llevaban esas camisas o blindajes de acero. A medida que las compañías constructoras fueron adquiriendo experiencia se pudieron instalar plataformas en aguas más profundas, sin otra modificación que aumentar el tamaño de las camisas o blindajes en cuestión. Las estructuras se fabricaban en astilleros accesibles a los lanchones. Antes de que se pusiera en marcha la explotación de los yacimientos petrolíferos del mar del Norte, la costa norteamericana del Golfo reunía la mayor concentración de fabricantes de esas estructuras metálicas. Se montaba cada sección de la camisa como si fuera un panel plano a nivel del suelo, se levantaba luego hasta su posición vertical con grúas-oruga de pluma larga, que se paseaban de flanco a flanco conforme se desarrollaba la elevación. Se soldaban entonces los paneles en una sola estructura, se deslizaban sobre lanchones especiales, se transportaban hasta su destino en el mar y se arrojaban al agua sobre un par de balancines. La estructura flotaba lo suficiente para mantenerse en posición horizontal, con el panel superior sobresaliendo del agua. Un mecanismo de inundación controlada la obligaba a rodar, en ese punto, hasta alcanzar la vertical, en cuya posición llegaba hasta el fondo, donde se la fijaba con pilotes.

El uso de esas camisas (o "jackets" como suelen denominarse en la terminología técnica del sector) arrojadas por un lanchón presenta bastantes ventajas en aguas costeras de escasa hondura, ya que ni siquiera las mayores barcazas de ésas poseen mucho calado. Con una cuidadosa fijación, que requiere la soldadura de la camisa a la cubierta del lanchón, se han transportado por todo el mundo camisas mayores que las propias embarcaciones. Podía escogerse el astillero donde construirlas que resultara más económico y, desde allí, enviarlas poco menos que a cualquier sitio.

Había una limitación obvia en ese método de construcción de plataformas: la disponibilidad de barcazas de envergadura suficiente para poder manejar las pesadas cargas sobre cubiertas en voladizo cuando tenían que transportarse las camisas a través del mar abierto. Pero el problema no se hizo agobiante hasta el descubrimiento de los grandes depósitos de petróleo que encerraba el mar del Norte. En 1972 se descubrieron esos enormes yacimientos, sitos en el sector británico y en el noruego, con reservas recuperables que excedían los 500 millones de barriles de petróleo crudo. A las compañías no se les ocurrió otra cosa que extrapolar las prácticas que venían desarrollando en el golfo de México. Pero no tardó mucho en verse que había diferencias fundamentales entre una zona y otra.

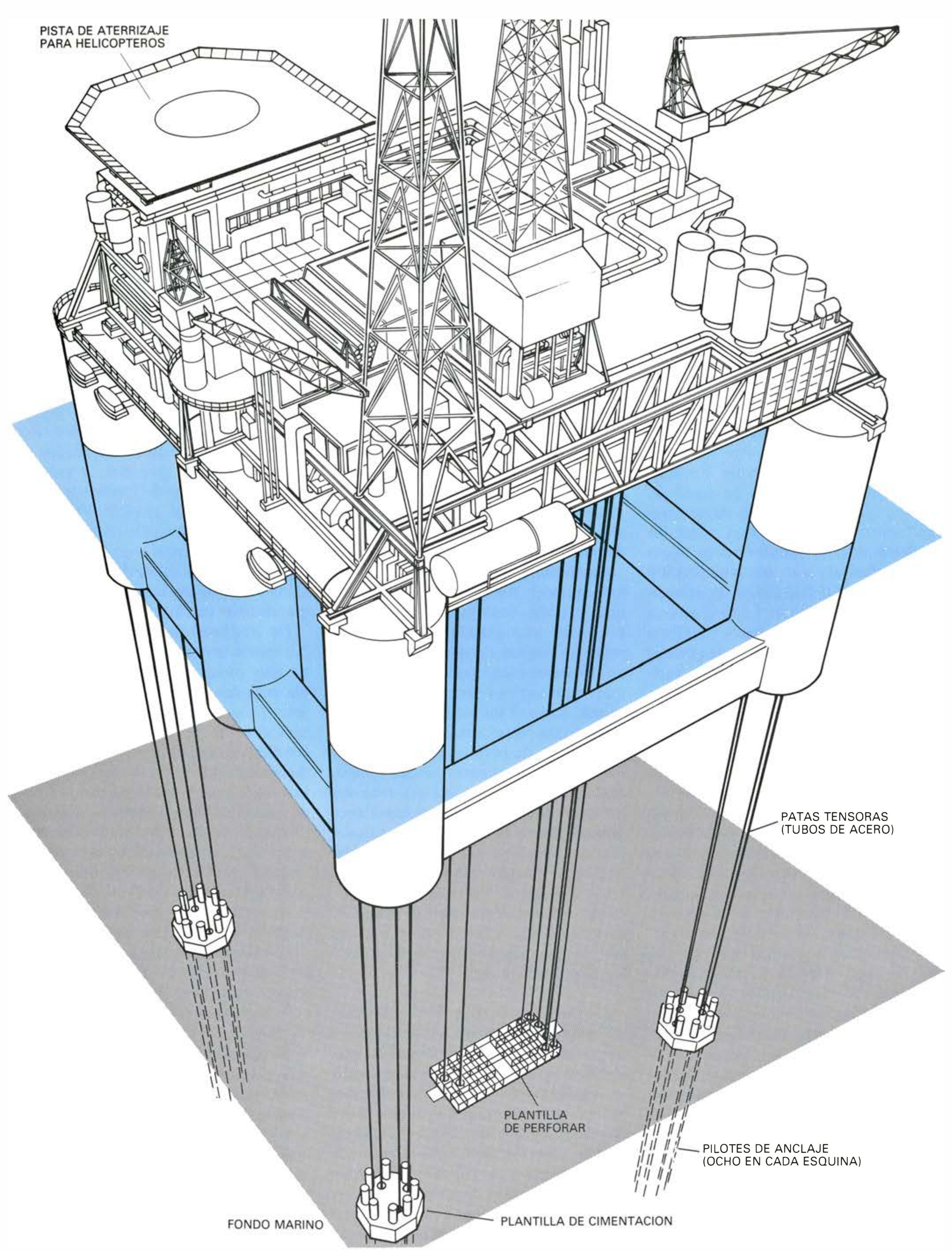
La tecnología de las plataformas tomó entonces dos caminos, divergencia que persiste todavía. A la hora de proyectar una plataforma idónea de acuerdo con las condiciones reinantes en Norteamérica, podemos presumir que transcurrirán largos períodos de calma, durante los cuales se afirmarán al fondo las plataformas y se levantarán los equipos de perforación y funcionamiento. Las estructuras pueden ser modestas, y ello porque las reservas son bastante discretas y porque hasta hace poco el precio del crudo no justificaba grandes inversiones. Pero cuando hubo que erigir plataformas sobre los ingentes yacimientos del mar del Norte, cuyas aguas forman olas de hasta 30 metros de altura con relativa frecuencia, se hizo imperioso introducir profundas innovaciones.

Así pues, una de las diferencias fundamentales entre las tecnologías empleadas en las plataformas del mar del Norte y en las noteamericanas tenía su causa en las distintas condiciones ambientales. Pensemos que una plataforma instalada en el mar del Norte puede albergar 300 trabajadores sin medios seguros para abandonarla cuando se desencadene de pronto una fuerte tormenta. Los vientos y los temporales son allí cosa tan común que han tenido que diseñarse todas las plataformas de la zona suponiendo que la tripulación se verá expuesta a las borrascas más severas. Por contra, en el golfo de México se sigue puntualmente el itinerario de los huracanes para poder evacuar a los empleados antes de que corran el menor peligro.

Hay unas 150.000 personas que trabajan en el diseño, construcción y gestión de las plataformas marinas. Lo que absorbe unos gastos anuales cifrados en más de 15.000 millones de dólares, que irán creciendo en el futuro, según se ha previsto, a razón de un 20 por ciento anual. Esta rama de la explotación petrolífera no se funda sólo en las disciplinas tradicionales: ingeniería civil, mecánica, química y eléctrica y arquitectura naval. Busca apoyo también en las hidroacústica, geología marina, mecánica de fracturas y análisis estructural inelástico no lineal. Una idea de esa diversidad nos la ofrece el panorama que presenta cada año la Offshore Technology Conference, patrocinada por once de entre las principales sociedades internacionales de ingeniería y ciencia, que agrupan a más de 400.000 profesionales, de los que unos 85.000 toman parte en las conferencias anuales. A lo largo de los últimos diez años se han publicado varios miles de trabajos técnicos sobre temas relacionados con las plataformas marinas.

De las plataformas que voy a describir, tres se instalarán en el mar del Norte, muy próximas entre sí. Aunque todas cumplan el mismo cometido, el diseño proyectado para cada una varía radicalmente de un caso a otro. Las condiciones ambientales serán prácticamente idénticas para las tres, si exceptuamos la profundidad del mar y el tipo de suelo. En líneas generales, cualquier proyecto de los tres podría haberse adaptado a las especiales exigencias de los tres puntos de asentamiento. Las peculiaridades de cada diseño vinieron determinadas, en gran medida, por la decisión inicial acerca de cómo fabricar, transportar y anclar la plataforma en el suelo marino. Habremos de centrarnos, pues, en los pormenores de esas decisiones fundamentales.

La plataforma Magnus constituye el primer proyecto de los tres. Destinada al sector británico del mar del Norte, se halla en su fase de fabricación, financiada por la British Petroleum Company Ltd. Su estructura o camisa de acero será la más pesada de cuantas se han ideado hasta el presente; se inscribe por tanto en esa modalidad técnica de la ingeniería de las plataformas, como un fruto de la experiencia recabada ya. También será, con mucho, el proyecto más caro de los cuatro, con un coste estimado de 2600 millones de dólares.



PLATAFORMA HUTTON DE PATAS EN TENSION, que nos ilustra la complejidad de la que participan todas las grandes estructuras petrolíferas marinas. Los equipos de perforación y funcionamiento descansan sobre un casco flotante diseñado para resistir el oleaje. Cuatro conjuntos de amarras de acero tubular fuertemente tensadas, ancladas al lecho marino por cimientos colocados previamente en cada esquina, sujetan el casco al fondo. Las amarras tiran del casco hacia abajo de forma tal que nunca podrán aflojarse, por más que sufran la acción de la ola de mayor tamaño que pueda preverse. Cuando la plataforma esté instalada, se perforarán los pozos a través de conductos que guiarán el tubo de sondeo a través de una plantilla de taladro aposentada sobre el suelo antes de la fijación de la plataforma. En los temporales más violentos, la plataforma oscilará, si es preciso hasta 24 metros de la vertical, sin perder su nivel en ningún momento. La plataforma Hutton está concedida a Conoco, una división de E. I. du Pont de Nemours & Company.

El peso de la camisa ("jacket" o estructura, como también venimos llamándola) llega a las 41.000 toneladas, rebasando así la potencia de los lanchones normales, por lo que se ha diseñado para construirla en flotación. Tiene dos patas mayores que las otras dos. Los compartimentos de flotación construidos en las patas de mayor tamaño posibilitarán que la camisa de la Magnus flote de costado, con poco calado y la mayor parte del armazón fuera del agua. La camisa se está fabricando sobre un lado en un dique seco, dispuesto al efecto en la localidad escocesa de Nigg Bay, en un taller con medios suficientes para armar los paneles laterales y soldarlos entre sí. En cuanto terminen los trabajos de construcción de la camisa, se procederá a inundar el dique seco, para que una flotilla de remolcadores arrastren la estructura acabada hasta el campo Magnus. Llegados al punto de instalación, sito a 240 millas al nordeste de la costa escocesa, el asentamiento más peligroso que nunca haya programado la explotación petrolífera marina, se inundarán las patas flotantes de la camisa, dando así un giro la estructura hasta erguirse verticalmente. En cuya posición se afirmará entonces sobre un fondo de lodos especialmente habilitado ("mud mat" lo llaman los ténicos), que controlará su introducción en el lecho marino.

Ya tenemos aposentada la plataforma. Habrá que nivelarla y fijarla con nuevo pilotes primarios en cada esquina. Los pilotes consistirán en secciones de tubos de acero unidas por soldadura. A intervalos regulares en cada columna de esquina de la camisa, se alojarán las pilas de hincar, de suerte que los pilotes puedan clavarse por un martillo conductor desde la superficie, y no bajo el agua. Cuando se clava un pilote desde la superficie, hay que colocar un embutidor entre el mismo y el martillo conductor, embutidor que se agregará cuando se hinque unos 90 metros el pilote primario. A medida que se van clavando pilotes, atraviesan éstos portaempaquetaduras que, en su expansión, sellan el espacio comprendido entre el pilote y su manguito de camisa, una vez el pilote ha alcanzado su profundidad máxima. Se bombea luego lechada de cemento sobre dicho espacio, rematándose así la conexión estructural.

Los equipos de perforación y funcionamiento, destinados al sondeo de los pozos, tratamiento del petróleo crudo cuando llega a la superficie y alojamiento de una tripulación formada por unos 200 trabajadores, se están montando en forma de 14 módulos. Se embarcarán éstos hasta su emplazamiento en alguno de los barcos grúa semisumergibles que faenan en el mar del Norte, con capacidad de 3000 toneladas, buques que quizá se encarguen también de asentarlos en su lugar correcto. Habrá módulos que pesen más de 2000 toneladas y tendrán que colocarse nada menos que a 46 metros por encima del nivel del mar. Desde la misma fase de proyecto, y a lo largo de todas las etapas de realización, habrá que mantener un severísimo control del peso y el tamaño de los módulos, al objeto de lograr una absoluta seguridad y rapidez en la instalación de los mismos.

Alguien podría pensar que, para elevar un módulo de 2000 toneladas, una grúa de 3000 toneladas dispone de capacidad sobrada. No es este el caso. La capacidad de las grúas suele establecerse considerando que su pluma está en una posición elevada, pero no lo está cuando se colocan los módulos en el centro de la cubierta superior. Por tanto ha de introducirse en los cálculos un margen suficiente de previsión por si se presentaran cambios no programados en el peso declarado de los módulos y otras contingencias que pudieran poner en peligro las maniobras de elevación. Puesto que los equipos de perforación y funcionamiento han de instalarse en mares razonablemente en calma, el levantamiento de la plataforma Magnus se previó con cuatro años de antelación: había de llevarse a cabo en el intervalo de una "ventana" o paréntesis en que reinasen las condiciones atmosféricas deseables. Condición a la que se halla sujeto el proyecto entero.

Habíamos dejado la descripción en la instalación de los módulos. Quedan todavía millones de horas-hombre en el mar para trabajos de acoplamiento, conexionado y puesta en marcha, antes de que comiencen las labores de sondeo. La masa laboral que requieren esas actividades sobrepasa, de lejos, la capacidad de los alojamientos habilitados en la plataforma para su plantilla permanente de 200 hombres, encargada en el futuro de la operación y mantenimiento. Habrá que montar, pues, uno o varios hoteles flotantes ("flotels") atracados a lo largo de la plataforma, que den albergue a esa población eventual. Esos hoteles aportarán el alojamiento, los talleres y otros servicios que precisen los cascos semisumergibles de perforación. Se atracarán junto a la plataforma Magnus, para que pueda accederse a ésta por medio de pasarelas.

Terminada en lo esencial la fase de acoplamiento, se procederá a la perforación de 15 pozos desde la plataforma. Al sondearse con una inclinación de hasta 55 grados con relación a la vertical, podrán explotarse puntos del yacimiento distantes hasta tres kilómetros de la plataforma. Antes de colocar ésta, se perforarán verticalmente seis pozos de la bolsa, alejados demasiado de la torre para que se pudiera llegar hasta ellos por sondeo direccional. Habrá que conectarlos pues a la plataforma mediante un tendido de oleoductos submarinos. La Magnus comenzará a rendir en 1985, a los doce años de haberse descubierto el yacimiento. Se convertirá, sin duda, en el exponente más avanzado de la tecnología de las plataformas de camisa de acero. Y, por muchos años, será también la estructura petrolífera marina en la que se haya invertido más dinero. El coste de capital por barril diario de producción superará probablemente los 20.000 dólares, lo que significa multiplicar por 40 ese mismo parámetro en las explotaciones continentales de Oriente Medio.

Vayamos a la Statfjord *B*, la plataforma de hormigón más avanzada de cuantas se han construido hasta la fecha. A lo largo de los últimos doce años, contratistas noruegos, británicos y franceses han levantado más de 20 de estas estructuras fundadas en la gravedad, llamadas de "base gravedad". La dirección de la ingeniería del proyecto en curso corre a cargo de la Mobil Oil Corporation, empresa que posee una participación minoritaria en el gigantesco campo petrolífero de Statfjord Aquellos ingenieros que en un principio no callaron su escepticismo respecto a esa nueva tecnología, reconocen hoy en la plataforma de hormigón unas cualidades destacadas para las condiciones que concurren en el mar del Norte.

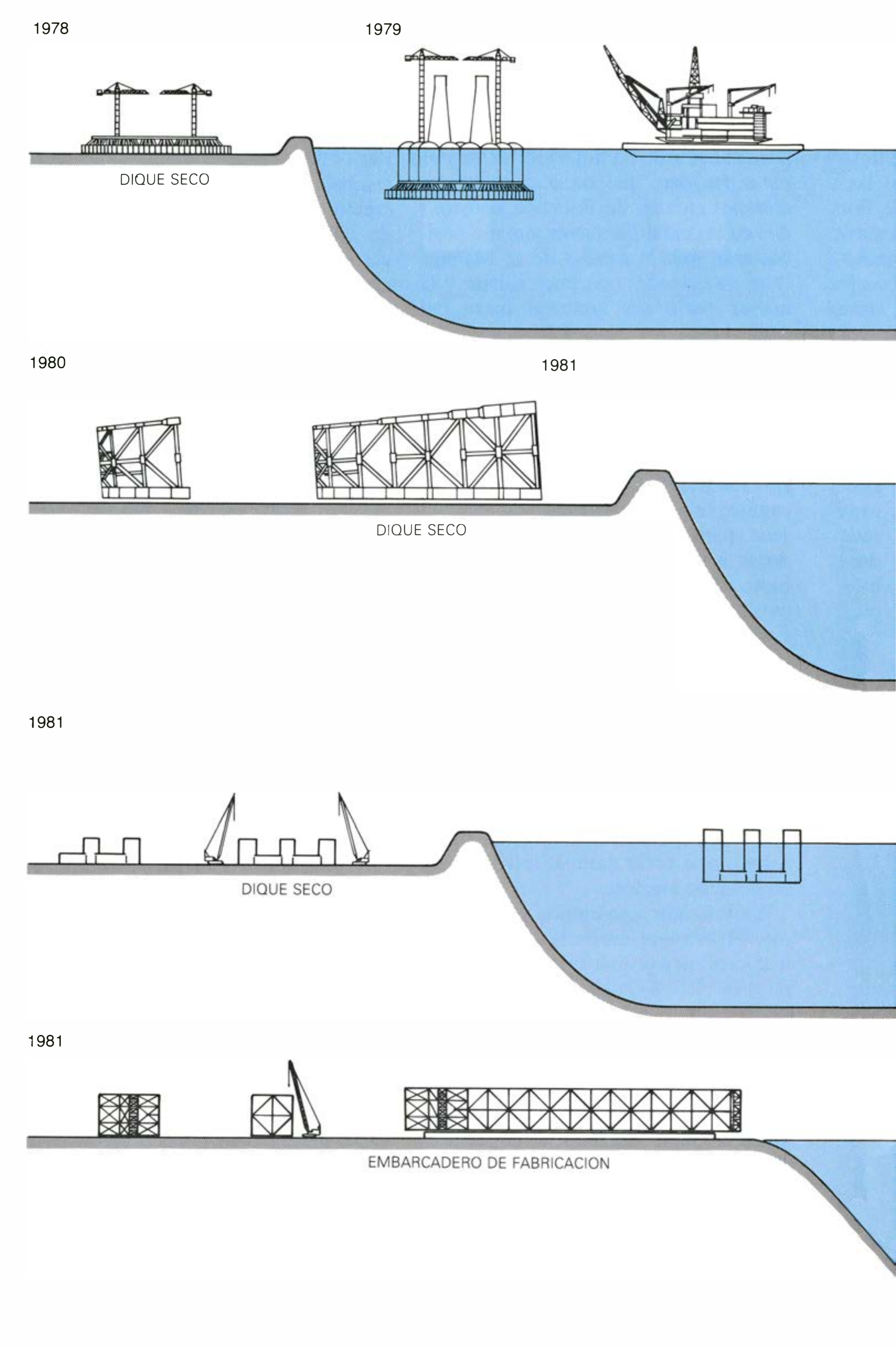
La base de la Statfjord *B* consta de 24 celdas distribuidas en una configuración en panal. Cada celda mide 20 metros de anchura y las paredes tienen un espesor de 90 centímetros. La construcción de la base se empezó en un gran dique seco de Stavanger, puerto del fiordo noruego Stavanger. Cuando las celdas de cimentación alcanzaron ya suficiente flotabilidad y resistencia estructural, se anegó el dique seco y se desplazó la base a medio fabricar hasta aguas profundas. Allí se completó el trabajo con la ayuda de una planta de hormigón flotante. Veinte celdas recibieron un acabado en forma abovedada; las cuatro restantes, que habrían de constituir las columnas de la plataforma, se terminaron en pendiente. A medida que se iba trabajando en la cons-

trucción, se sumergía gradualmente la plataforma al objeto de mantener la planta de hormigón flotante en el nivel más adecuado para la fase de operación que se estaba cumpliendo.

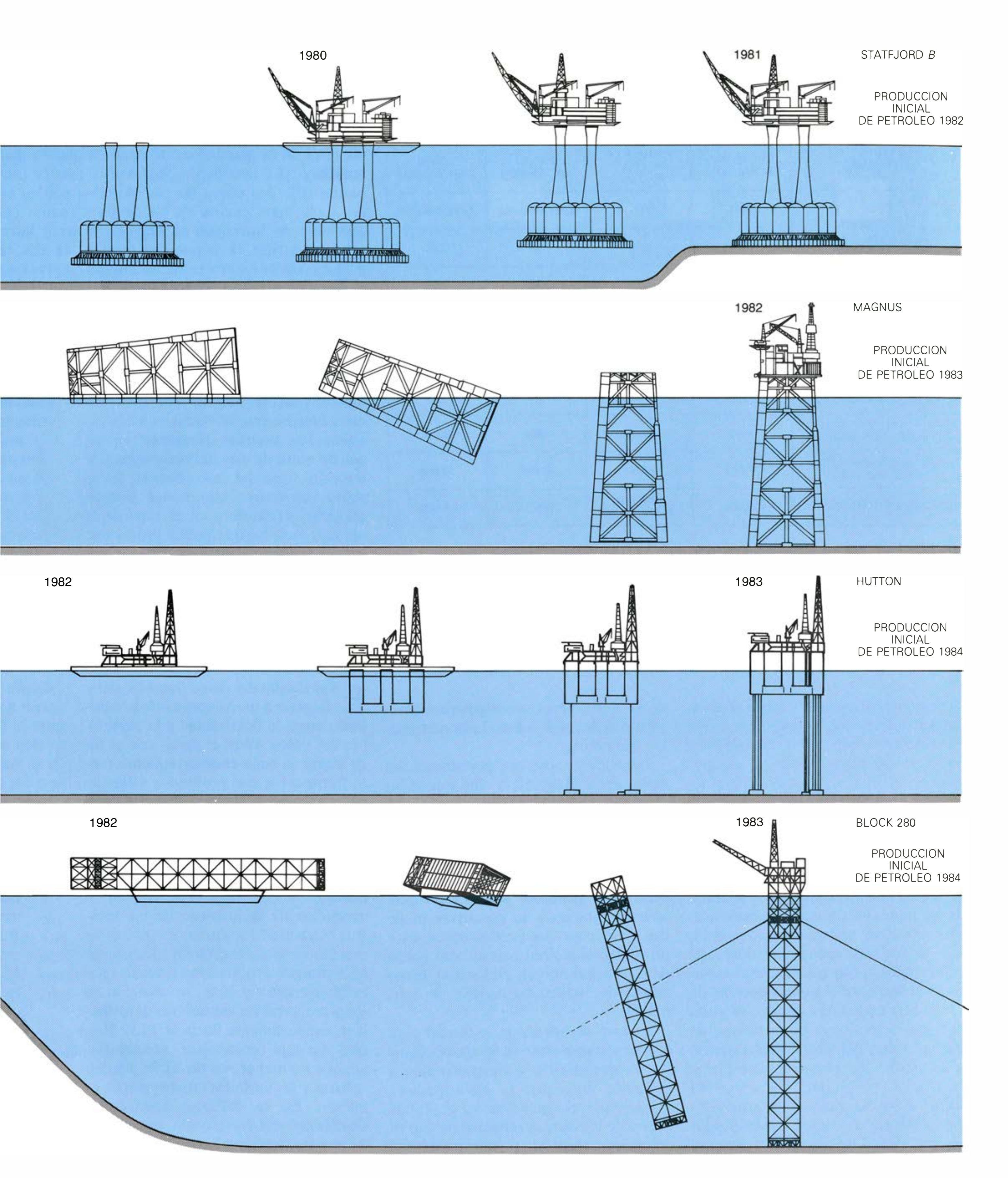
Las celdas abovedadas de la base de la Statfjord *B* servirán para almacenar petróleo crudo y combustible diesel. El acceso a las celdas se consigue por medio de bombas y tuberías alojadas en una de las cuatro columnas. De las tres restantes, dos actuarán de conductos a través de los cuales se sondearán los pozos; la cuarta columna se destinará a funciones exentas de riesgo. Todas las columnas, a excepción de la destinada a las bombas y tuberías, se inundarán una vez instaladas. De acuerdo con el proyecto, las estructuras de base gravedad permanecerán verticales durante su traslado a alta mar. Lo que permitirá la instalación de los equipos de perforación y funcionamiento en aguas tranquilas, antes de que la plataforma llegue arrastrada hasta su emplazamiento.

Mientras se construía la base de hormigón de la Statfjord *B*, los equipos de perforación y funcionamiento, que pesaban unas 41.000 toneladas, se fueron montando en un varadero próximo. Los distintos componentes se construyeron sobre deslizadores y se integraron en una gran estructura de acero que se colocaría sobre la base de hormigón. En esta fase, la armadura de soporte, con un peso de 7000 toneladas, descansaba sobre cuatro columnas provisionales apuntaladas en las aguas someras próximas al varadero. Posteriormente se instalaron los módulos de perforación en la parte superior de la armadura; los módulos de alojamiento (de ocho pisos de altura, para acomodar a una tripulación de 200 hombres) se colocaron a un lado de la plataforma, lo más lejos posible de las zonas de peligro. Se mejoraron las condiciones de seguridad levantando muros de protección contra incendios y explosiones entre los módulos de alojamiento y las unidades de producción. Esa es la razón por la que la Statford *B* está considerada una instalación muy segura.

Cuando a principios del pasado año se dieron por terminados los trabajos implicados en la habilitación de los equipos de perforación y funcionamiento de la Statfjord *B*, se colocaron cuatro barcazas del mar del Norte, fuertemente lastradas, bajo la armadura de soporte. Cuando se eliminó el lastre, las barcazas levantaron en bloque toda la instalación. A continuación se procedió a remolcar el conjunto hasta el lugar del fiordo Stavanger, donde esperaba ya la base, sumergida hasta que



PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCION Y EMPLAZAMIENTO utilizados en las cuatro plataformas marinas descritas en el artículo. En varios aspectos, el diseño más audaz corresponde a la Statfjord *B*. Iniciada la base de hormigón, se puso a flote en el fiordo Stavanger, donde las cuatro columnas de hormigón se fueron prolongando con el vertido de hormigón en moldes desde su fábrica flotante de cemento. Contemporáneamente se prepararon los equipos de perforación y funcionamiento sobre una base provisional, llevados luego flotando hasta su emplazamiento sobre las columnas sumergidas. Se remolcó luego la estructura ya integrada unas 230 millas hasta un lugar ya preparado en el campo petrolífero de Statford. La camisa de acero que soportará a la plataforma Magnus se está terminando de construir en un dique seco en Nigg Bay, en Escocia. Los compartimentos de flotación situados en dos de las cuatro patas de la estructura proporcionarán la suficiente flotabilidad a la torre de 41.000 toneladas



para que se mantenga a flote cuando se la remolque hasta el campo Magnus, el punto más septentrional del mar del Norte que vaya a entrar en explotación. La torre se anclará en el fondo por medio de pilares tubulares de acero, clavados a 92 metros suelo adentro. Barcos grúa semisumergibles izarán entonces sobre la torre los voluminosos equipos de perforación y funcionamiento. El casco de la plataforma Hutton, de patas en tensión, se halla asimismo en fase de construcción en un dique seco de Nigg Bay. Una vez que ese casco se ponga en flotación a aguas profundas, y se le sumerja parcialmente, se embarcará, como un todo, formando bloque con los equipos de perforación y funcionamiento, hasta su punto de asentamiento. Habrá que remolcar entonces la plataforma completa hasta el campo Hutton, donde se encajará en sus ya preparados cimientos. La Hutton se divisará desde la Statfjord *B*. La torre arriostrada Bock 280 se está preparando en Corpus Christi, Texas. A lo largo de este año, se la embarcará, para su traslado a un lugar distante 500 millas, en el golfo de México, donde un lanchón la lanzará al mar. La torre tendrá la flotabilidad suficiente para mantenerse en el agua. Inundándola de forma controlada, irá recuperando su posición vertical, hasta reposar en el fondo del mar. Una red de veinte cables radiales sujetarán la torre para mantenerla fija. Cuando los pilotes de cimentación se hayan clavado, podrán colocarse los equipos de perforación y funcionamiento (los "topsides").

	STATFJORD *B*	MAGNUS	HUTTON	BLOCK 280 (MISSISSIPPI CANYON)
LOCALIZACION	MAR DEL NORTE (NORUEGA)	MAR DEL NORTE (G. B.)	MAR DEL NORTE (G. B.)	GOLFO DE MEXICO (EE.UU.)
ESTRUCTURA	GRAVEDAD, HORMIGON	CAMISA DE ACERO Y PILOTAJE	PATAS EN TENSION	TORRE ARRIOSTRADA
TIPO	FIJA	FIJA	DEFORMABLE	DEFORMABLE
COLUMNA DE AGUA (METROS)	144	186	148	305
OLA MAX. EN 100 AÑOS (METROS)	30,5	31,1	30	22
PRODUCCION (BARRILES/DIA)	150.000	120.000	110.000	25.000
PRODUCCION INICIAL (AÑO)	1982	1983	1984	1984
DESPLAZAMIENTO MAXIMO DE LA CUBIERTA (METROS)	<0,91	1,22	24	11,9
COSTE TOTAL APROXIMADO (MILLONES DE DOLARES)	1800	2600	1300	8000
COSTE POR BARRILES DIARIOS (DOLARES)	12.000	21.700	11.800	32.000
DIRECCION DEL PROYECTO	MOBIL	BRITISH PETROLEUM	CONOCO	EXXON

RESUMEN DE LAS CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES de las cuatro plataformas petrolíferas marinas reseñadas en el artículo junto con sus costes estimados y los nombres de las compañías concesionarias. Hay una diferencia fundamental de diseño que caracteriza, por una parte, a las estructuras de Statfjord *B* y Magnus, y, por otra, a las de Hutton y Block 280. Las dos primeras están rígidamente fijadas al suelo marino; el desplazamiento máximo de la cubierta se verá así limitado a un metro escaso, incluso en las condiciones más severas del mar. Las otras dos plataformas son deformables, cuya flexibilidad les permite adaptarse mejor al oleaje y a las fuertes corrientes. Si atendemos al precio del petróleo, que ha alcanzado ya los 34 dólares por barril, se justifican las elevadas inversiones del capital indicadas.

las columnas alcanzaron, sobre el agua, la misma altura que las columnas provisionales. El acople de las dos estructuras se realizó maniobrando los equipos hasta encajarlos en las cuatro columnas de la base. Se soltó luego el lastre de la base a fin de que pudiera soportar la carga de 41.000 toneladas de peso. Los dos componentes principales que conformaban la plataforma se conectaron por medio de barras tensadas y se amalgamaron en una estructura monolítica.

En el mes de agosto del año pasado, cinco de los mayores remolcadores del mundo arrastraron las 899.000 toneladas de la Statfjord *B* a una velocidad de 1,7 nudos, costeando cuanto se pudo las aguas de Noruega hasta su destino final en el mar del Norte: una distancia de 230 millas. Se colocó la plataforma en un punto, prenivelado, situado a 144 metros de profundidad. Se terminó la instalación sin descansar sobre el pilotaje. A medida que esa mole inmensa se iba hundiendo en el fondo marino, fue liberando agua en el suelo subyacente. Agua libre que se drenó a través de pozos poco profundos perforados desde el suelo. Este drenaje contribuirá a asegurar la no licuación del fondo cuando se produzcan olas de tormenta que causen un ligero apalancamiento de la torre, con el consiguiente incremento de la carga sobre el perímetro de los cimientos.

Es evidente que una plataforma del estilo de la Statfjord *B* sólo puede levantarse en determinados lugares del mundo. Sin contar con aguas profundas y tranquilas no hubiera resultado rentable empeñarse en esa estructura mastodóntica de hormigón del tipo base gravedad. El proyecto se hizo posible, además, gracias a la concurrencia de dos elementos: los fiordos noruegos y un centro industrial con un alto grado de especialización en el diseño y fabricación de estructuras marinas de hormigón.

La base de hormigón se diseñó para recibir y transportar en bloque el equipo de perforación y funcionamiento, contando con que: la base pudiera mantenerse en posición vertical, los suelos de los fondos submarinos fueran de tal naturaleza que pudieran soportar el peso de la plataforma sin pilotaje profundo y que existiera espacio suficiente en las celdas de la base para el almacenamiento del petróleo procedente de los pozos, proporcionando así capacidad complementaria. Al poder embarcar el petróleo a un buque-cisterna, no era necesario el tender un oleoducto hasta las costas de Noruega. Si no se hubiera dado alguna de estas condiciones, la Statfjord *B* habría tenido una configuración distinta.

El tercer proyecto de diseño avanzado es el de la plataforma de patas en tensión o TLP (del inglés "Tension-leg platform"). Así como las plataformas de acero tipo "camisa" y las de base gravedad de hormigón se consideran estructuras fijas, la de patas en tensión o TLP consiste en una estructura deformable: ofrece la habilidad de someterse a las olas de forma controlada. Las plataformas TLP constan de dos elementos estructurales principales: un casco flotante parecido a un equipo de perforación semi sumergible, aunque mucho mayor, y un conjunto de amarras verticales fuertemente tensadas en cada esquina. Las amarras, formadas por tubos de acero de elevada resistencia a la tracción, tiran del casco flotante hacia abajo, de suerte que nunca podrán aflojarse, ni siquiera en el valle de la ola más violenta que pueda producirse cada 100 años. El sistema de amarras, que permite cierto grado de movimiento lateral, evita el levantamiento o movimiento vertical propio de las embarcaciones que flotan libremente, como es el caso de los barcos de perforar.

En el diseño del casco flotante, debe llegarse a un compromiso de equilibrio entre la flotabilidad y la parte libre del casco sobre el agua, con el fin de lograr su buen comportamiento tanto frente a los más profundos valles de las olas como a las más elevadas crestas. La gran ventaja que ofrecen las plataformas TLP reside en la discreta variación que sufre su costo conforme aumenta la profundidad del asentamiento, ya que nada debe cambiar a excepción de la longitud de las amarras. Cuando la industria petrolera se percató de que se estaban alcanzando los límites de profundidad rentables para las estructuras fijas, su atención se desplazó hacia las estructuras deformables, especialmente hacia la TLP. Hay otra ventaja económica secundaria, aunque no menor, en las TLP: pueden soltarse y ser ancladas en otro emplazamiento. En la Offshore Technology Conference del año pasado, en materia de nuevos diseños, el que más atención atrajo, si nos guiamos por el número de comunicaciones al respecto, fue el de patas en tensión, o TLP.

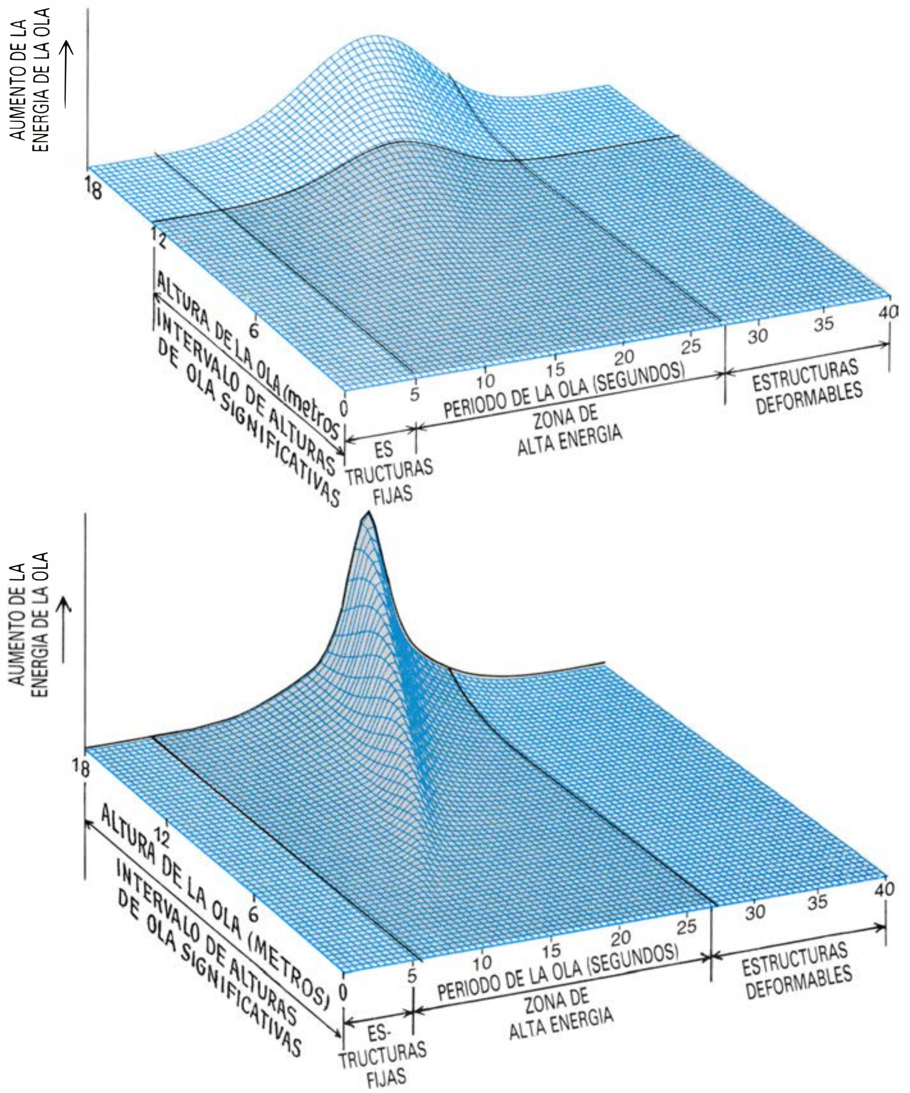
La plataforma Hutton, cuyo proyecto y construcción para el sector británico del mar del Norte corre a cargo de Conoco, Inc., será la primera plataforma comercial del tipo de patas en ten-

sión. Al igual que en el caso del tipo base gravedad de hormigón, el casco de la TLP se construye en un gran dique seco y se trasladará a un lugar de aguas profundas para su acople, donde pueda sumergirse y encajar el equipo de perforación y funcionamiento. Una vez acoplado, el conjunto formado por el casco y el equipo se remolcará hasta su lugar de instalación; se sumergirá para conectar sus amarras a los cimientos previamente colocados y se deslastrará para tensarlas. Podemos comparar el comportamiento dinámico de una plataforma de patas en tensión con el de un péndulo invertido, hecha la salvedad de que la plataforma se mantiene a nivel por la configuración, a modo de pantógrafo, de sus amarras. Cuando los temporales azoten, la plataforma Hutton, que cabalgará sobre 148 metros de agua, podrá oscilar hasta 24 metros desde la vertical, aligerando así el impacto de las olas.

Antes de que se instale la plataforma, se emplazará en el suelo marino una plantilla de perforar, dentro del perímetro de los cimientos de las amarras. Un equipo semisumergible de sondeo perforará entonces 13 pozos direccionales, que podrán conectarse a las tuberías de la superestructura cuando llegue la plataforma. La producción comenzará, pues, mucho antes de que hayan de abrirse los 24 pozos proyectados, una vez asentada la plataforma.

Tres razones abonaron la elección del diseño TLP: primera, se supone que es la vida de este campo más corta que la de otros del mar del Norte, por lo que una plataforma reutilizable aventaja a cualquier otra de estructura fija; segunda, se espera que el campo produzca poco gas, ya que la presión del petróleo es baja. No habrá necesidad de reinyectar gas en el campo conforme se vaya extrayendo el petróleo, operación que incrementa considerablemente el peso que la plataforma debe soportar. Tercera, el costo estimado de la plataforma TLP vino a coincidir con la inversión exigida en otra de acero tipo camisa. Por tales motivos, los promotores pensaron que el nuevo diseño TLP merecía una prueba exigente. Si la plataforma Hutton demuestra su eficacia en el severo ambiente del mar del Norte, aportará información muy valiosa, a nivel mundial, para futuras instalaciones. El proyecto Hutton marcaría así un hito en el desarrollo de las plataformas marinas.

Y vayamos con el modelo que resta: el de tipo torre arriostrada, en cuya construcción está empeñada la Exxon Corporation para el Block 280, en la sección Mississippi Canyon, del golfo de México. Aunque será la más barata de las cuatro plataformas, con una inversión aproximada de unos 800 millones de dólares, resultará, con mucho, la de un costo unitario más alto: unos 32.000 dólares por barril diario de producción. La compañía tuvo que hacer frente a un problema espinoso: la profundidad del agua en el lugar elegido alcanzaba los 305 metros. Por si fuera poco, la plataforma habrá de soportar considerables cargas en su cubierta para atender al desarrollo de 58 pozos. Lo mismo que la plataforma Hutton, la torre arriostrada es una estructura deformable. Consistirá en una torre ligera de acero de sección cuadrada, de 37 metros de lado. La torre guardará su posición correcta gracias a una formación radial de 20 cables de anclaje, de una longitud de 1037 metros cada uno. A unos 500 metros de la torre se sujetará un peso de 180 toneladas a cada cable. Con el mar en condiciones normales, estos pesos apiñados descansarán en el fondo y mantendrán tensos los cables. En los temporales, los pesos se levantarán gradualmente y permitirán que la torre se incline; el diseño admite un desvío máximo de la vertical de 12



ESTOS DIAGRAMAS DEL ESPECTRO MARINO ponen de relieve la importante relación que existe entre la energía del mar y el período de vibración fundamental de las plataformas petrolíferas. El diseño no sólo debe considerar el más violento embate del oleaje previsible en toda la vida de la estructura, sino también el efecto acumulativo de varios millones de olas por año, con un período que armonice con el período fundamental de la torre. Las estructuras marinas se proyectan de suerte que sus períodos caigan fuera de la zona de alta energía del espectro energético de las olas. Si no se tomara esta medida, la amplificación dinámica acortaría sensiblemente la vida útil frente a la fatiga. El espectro superior se basa en las condiciones que se dan en el golfo de México, donde se instalará la torre arriostrada Block 280. El espectro inferior refleja las condiciones típicas del mar del Norte. Para confeccionar estos "diagramas manta" ha habido que transformar complejos registros de olas aleatorias, en un gran número de olas regulares de pequeña amplitud y fase aleatoria. Las "olas significativas" son un promedio del tercio superior de las olas en cualquier condición de mar, por lo que son mucho menores que la mayor ola que se pueda producir en dicha zona del océano. En estos diagramas, una ola significativa de 18 metros puede interpretarse como una ola máxima de 30 metros. Los gráficos, obtenidos por medio de un ordenador, han sido preparados por Ross Cowan, de los International Software Services de San Mateo, California.

metros a nivel de cubierta. A este bandeo, la cubierta no se inclinará más de dos grados.

El peso total de la torre y sus tirantes se cifra en torno a las 43.000 toneladas, cómputo equiparable al asignado a la plataforma Magnus. Los equipos de perforación y funcionamiento se emplazarán sobre tres cubiertas, con una superficie conjunta de 6975 metros cuadrados. La formación de tirantes de alambre cubrirá una extensión superior a los 3,2 kilómetros cuadrados; pero incluso donde los tirantes se sujetan a la torre, estarán los suficientemente sumergidos para dejar despejada la superficie para la navegación.

Se comentaba, al comienzo de este artículo, que la vida útil con respecto a la fatiga de las estructuras sumergidas dependía, de forma importante, del número de olas por año, cuyo período venía a coincidir con la frecuencia natural de la plataforma. A este propósito, la torre arriostrada ofrece una clara ventaja sobre la plataforma de camisa de acero: allí donde una torre sumergida de 303 metros de altura tiene un período natural de unos 30 segundos, una estructura sumergida del tipo de camisa de las mismas dimensiones tendrá un período natural de 5 segundos. En el golfo de México, una estructura con una frecuencia natural de 5 segundos resonaría con muchas más olas por año que lo haría una estructura con una frecuencia natural mucho mayor. Con una frecuencia natural de 30 segundos, la torre saltará por encima de la banda de más alta energía del espectro.

La torre arriostrada de Exxon se montará en los astilleros de Corpus Christi, Texas, cuya técnica avalan los muchos años que llevan dedicados a la construcción de plataformas del tipo camisa. Una vez terminado el armazón de la torre, se hará deslizar sobre una gran barcaza, que lo transportará hasta su emplazamiento. Allí se botará la torre sobre un costado de la barcaza para minimizar las tensiones de botadura. Las del tipo de camisa se botan, normalmente, sobre un extremo de la barcaza, procedimiento que con frecuencia crea tensiones más elevadas que las que se ejercen cuando la plataforma está en servicio. La flotabilidad de la torre le permitirá mantener su panel superior sobre el agua. Por medio de inundaciones controladas se logrará rotarla hasta que adquiera su posición vertical.

Para cuando la torre llegue al Block 280, a 65 millas del sureste de Grand Isle, Louisiana, se habrán clavado, 46 metros dentro del fondo del mar, 20 pilotes donde anclar los tirantes. Se instalará además una plantilla de perforación cerca de la base de la torre. Tomando como guía la plantilla de perforación, se colocará la torre sobre un lecho de lodo y, desde la cubierta, se clavarán, hasta 171 metros suelo adentro, ocho pilotes de cimentación.

A la vista del elevado coste de las plataformas petrolíferas marinas que he descrito, equivalente o superior al de una gran planta nuclear o al de toda una refinería, se evidencia la necesidad que tiene este sector industrial de confiar en diseños suficientemente comprobados. Por otro lado, la industria se está encontrando constantemente con condiciones ambientales que trascienden la experiencia acumulada. Aparte de los cuatro diseños aquí recogidos, se han estudiado muchos diseños mixtos que combinan acero y hormigón en ingeniosos maridajes con configuraciones fijas, deformables y flotantes. Y aunque algunos se han aplicado ya en situaciones especiales, no parece que hayan de torcer el rumbo de las futuras estructuras marinas.

Una región donde las nuevas ideas y modelos sobre plataformas raramente se necesitan es en el Artico. Los hielos y los icebergs presentan allí fuerzas de gran magnitud. En el North Slope, de Alaska, las compañías de petróleo han experimentado con plataformas de grava levantadas en aguas de hasta 20 metros de profundidad. Estas plataformas se han comportado satisfactoriamente para pozos de exploración. Pero aunque resisten, incluso durante años, el agua helada, no parecen ofrecer garantías para instalaciones permanentes.

En mar abierto, mucho más hondo, los icebergs árticos introducen un tipo caprichoso de fuerza de los elementos. Se dice que los icebergs pequeños, arrastrados con violencia por el oleaje de las tormentas, suponen una amenaza mayor que la de los grandes icebergs, que pueden desplazarse sólo a la velocidad que les imprimen las corrientes que los transportan. Para enfrentarse al peligro de los icebergs se prevén tres soluciones: estructuras de hormigón, que por su propia masa pueden absorber el impacto de un iceberg, plataformas de patas en tensión diseñadas para soltarse bajo el efecto de fuertes embestidas y pozos embutidos en el fondo marino acoplados a sistemas de producción flotantes. Se presume que, en un futuro próximo, la industria experimentará los tres sistemas.

Pasemos del campo de las instalaciones físicas a los gabinetes de proyectos. El diseño de una gran plataforma marina atraviesa ocho fases fácilmente identificables, desde el descubrimiento del petróleo hasta su explotación, intervalo que comprende de cinco a catorce años. Estas ocho fases se pueden resumir en dos etapas básicas: planificación y ejecución. Para el óptimo funcionamiento de cada etapa, se requieren actitudes y habilidades técnicas distintas, aunque la continuidad del trabajo de una etapa a otra resulta de importancia fundamental.

La primera etapa, cuando se decide qué se debe construir, supone un periodo de intensa investigación que requiere la mejor experiencia de una industria en rápido desarrollo. La investigación, exhaustiva, ha de llevarse a cabo con una mente abierta, no influida por intereses de los propietarios. Cuando se desarrollan limpiamente, los esfuerzos conducen a un entendimiento entre el equipo del proyecto y la gerencia en lo concerniente a los requerimientos básicos de trabajo de la plataforma marina y a las decisiones técnicas clave relativas a los métodos de diseño y construcción, programación y costes. Como regla general, sobre el 85 por ciento de las decisiones que determinan el costo final de un proyecto pueden tomarse en esta etapa. Diríamos que el resultado viene a ser una enciclopedia que recoge los aspectos significativos del proyecto y omite los pormenores. Este documento (al que yo prefiero llamar manual del proyecto), con la relación de los responsables principales, constituye el puente necesario para pasar a la segunda etapa.

La segunda etapa es la de ejecución del proyecto. Comprende el diseño, adquisiciones, fabricación e instalación. En esta etapa, establecidos ya los compromisos más importantes, la industria de las plataformas ha de abordar los problemas más delicados. Adviértase que han transcurrido sólo diez años desde que se descubrieron los primeros campos petrolíferos de interés comercial en el mar del Norte. Durante ese lapso, el precio del petróleo se ha elevado desde los 2 dólares por barril, hasta 34 dólares. La inflación se ha disparado en todo el mundo. La estructura impositiva se ha ido modificando continuamente. Las normas y reglamentaciones se han hecho cada vez más estrictas. Al propio tiempo, la industria ha tenido que adaptarse a los avances tecnológicos. Los cambios se han producido a un ritmo tan rápido como nunca se había conocido en el sector.

Por muy bien que se trace un plan, tendrá que modificarse casi de inmediato para adaptarlo a los imprevisibles desafíos técnicos, financieros y políticos. Durante este difícil período que

comprende entre cinco y siete años, los costes finales pueden elevarse astronómicamente, a menos que las tomas de decisión y la disciplina del proyecto sean inmejorables. Se asiste así a una lucha constante entre los que persiguen la perfección en el detalle, intentando incorporar la más moderna tecnología, y los que pretenden un equilibrio entre tales beneficios y los imponderables efectos secundarios contraindicados. La experiencia enseña que, en este segundo período, no suele darse la flexibilidad necesaria para asumir cambios.

Mirando hacia el futuro, de cuantas estructuras hay en desarrollo para la explotación de los yacimientos marinos, las plataformas de patas en tensión (TLP) son las que ofrecen un porvenir más brillante en aguas muy profundas. La versatilidad de su diseño, aplicable en un amplio rango de profundidades marinas, ofrece mayores posibilidades de estandarización que el de cualquier otro tipo. Por tratarse de una estructura deformable, la plataforma de patas en tensión no se ve afectada por la actividad sísmica. Quizá tenga su talón de Aquiles en la necesidad de mantener su flotabilidad bajo cualquier condición atmosférica, que limita su capacidad de carga en cubierta. El diseño de las plataformas de patas en tensión, al igual que el de las torres arriostradas, se halla todavía en el principio de la curva de aprendizaje; habrá de mejorar con el tiempo, sin duda. En las zonas árticas, sujetas siempre a la disponibilidad de suelos de fondos marinos adecuados, las estructuras de base gravedad con camisas de acero que penetran profundamente pueden ofrecer la fuerza y resistencia al cizallamiento necesarias para hacer frente a los masivos ataques del mar helado, de las aristas del hielo y de los icebergs.

Paralela al desarrollo de las estructuras de las plataformas, se observa la tendencia a confiar cada vez más en las ya mencionadas instalaciones submarinas. Tenemos un ejemplo en los seis pozos submarinos que se acoplarán a la plataforma Magnus. Y otro en la plantilla submarina de perforación bajo la plataforma Hutton, que se utilizará para la perforación provisional de los pozos. Probablemente, se acentuará esa tendencia a medida que se vaya adquiriendo más experiencia en las actividades submarinas. No obstante, la ingente cantidad de elementos humanos y mecánicos que necesitan del aire, y que son imprescindibles para las actividades de perforación y producción, garantizan que las actividades sobre la superficie del agua continuarán desempeñando el papel principal.

Alimentos que modifican la función cerebral

Por tales se entenderán los precursores de ciertos neurotransmisores. Si aumentamos su concentración en el cerebro, se refuerzan las señales emitidas por ciertas neuronas. De hecho actúan como medicamentos

Richard J. Wurtman

Casi todos estaríamos de acuerdo en que no es lo mismo alimentarse que medicarse. Las sustancias nutritivas aportan, en la mayoría de los casos, la energía y la materia prima molecular que el cuerpo necesita. Por su parte, el medicamento es una sustancia que se administra en razón del efecto que produce en un órgano o tipo celular determinado. Hay más: la gente sana precisa de los mismos alimentos, hablando a grandes rasgos; los medicamentos, por contra, se recomiendan sólo a quienes padecen una enfermedad, alteración o trastorno. Me ocuparé a lo largo de este artículo de tres sustancias nutritivas que, cuando se administran en su forma pura o se ingieren con los demás alimentos, actúan cual si de medicamentos se tratara. Ocurre que los tales originan cambios de importancia en la composición química y estructural del cerebro. Cambios que, a su vez, pueden modificar la función cerebral, especialmente en aquellos inviduos que sufren determinadas enfermedades metabólicas y nerviosas.

Los aminoácidos triptófano y tirosina son dos de las sustancias nutritivas en cuestión. Se llaman aminoácidos las unidades constitutivas de las proteínas. Así pues, triptófano y tirosina se hallarán en la mayoría de los alimentos. El tercer elemento nutritivo de que me ocuparé es la colina, un componente de la lecitina. Como especialmente ricos en lecitina recordemos la yema de los huevos, el hígado y la semilla de soja. Triptófano, tirosina y colina pueden llegar a alterar la composición y el funcionamiento del cerebro, ya que son precursores de los neurotransmisores: sustancias éstas que la célula nerviosa, o neurona, libera al ser estimulada. El neurotransmisor transmite entonces el impulso nervioso, a través de la sinapsis, a otra neurona, a una fibra muscular o una célula secretora. En los terminales de algunas neuronas el triptófano se convierte en el neurotransmisor serotonina. En otras células, la colina se transforma en el neurotransmisor acetilcolina. Y en un tercer grupo de células nerviosas la tirosina cumple una misión precursora de la dopamina, la noradrenalina y la adrenalina, trío que forman el conjunto de los transmisores catecolamínicos. Un incremento del nivel cerebral del precursor favorece la síntesis del correspondiente neurotransmisor. Y el aumento de éste insta, a su vez, una mayor liberación de moléculas transmisoras por parte de la neurona cuando se estimula dicha célula nerviosa, lo que comporta mayor transmisión de señales desde la neurona hasta las células que ésta inerva.

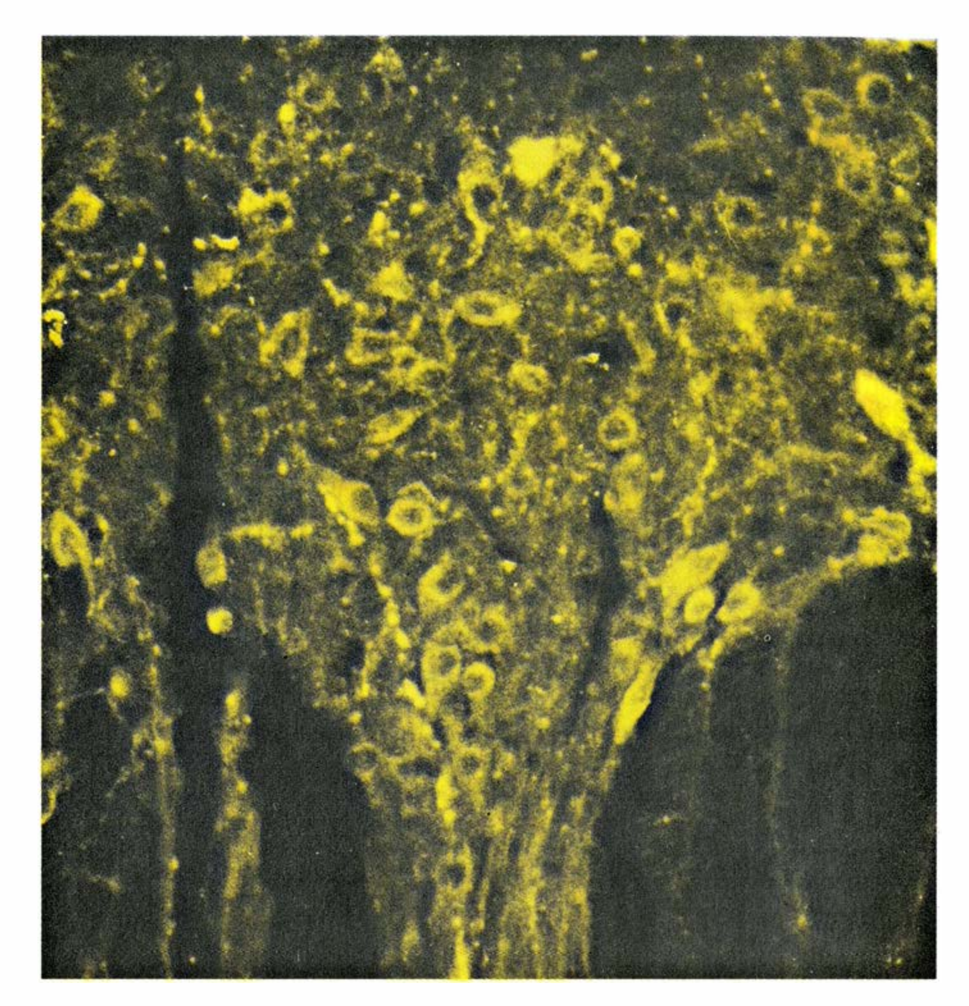
Junto con mis colegas del Instituto de Tecnología de Massachusetts y otros investigadores he venido estudiando las relaciones existentes entre la cantidad de un alimento administrado o ingerido, por un lado, y su nivel en plasma sanguíneo, su nivel en el cerebro y sus efectos sobre la transmisión nerviosa, por otro. No se trata de interacciones sencillas. La conversión de triptófano en serotonina viene condicionada por la proporción que haya de glúcidos en la dieta. A su vez, la síntesis de serotonina afectará a la proporción de glúcidos que el individuo escoja luego en su alimentación. ¿Qué decir de la colina y la tirosina? El efecto que produce en la neurona un mayor suministro de una u otra sustancia nutritiva varía con la frecuencia de descarga de la neurona y puede inducir cambios en dicha frecuencia. Por consiguiente, la colina y la tirosina pueden potenciar, de una manera selectiva, la neurotransmisión; vale decir: la aumentarán en unas sinapsis, pero no en otras. Discrecionalidad que cabría aprovechar a la hora de diseñar nuevos agentes terapéuticos contra varias enfermedades, y estoy pensando en la hipertensión, enfermedad de Parkinson y alteraciones de la memoria de los ancianos.

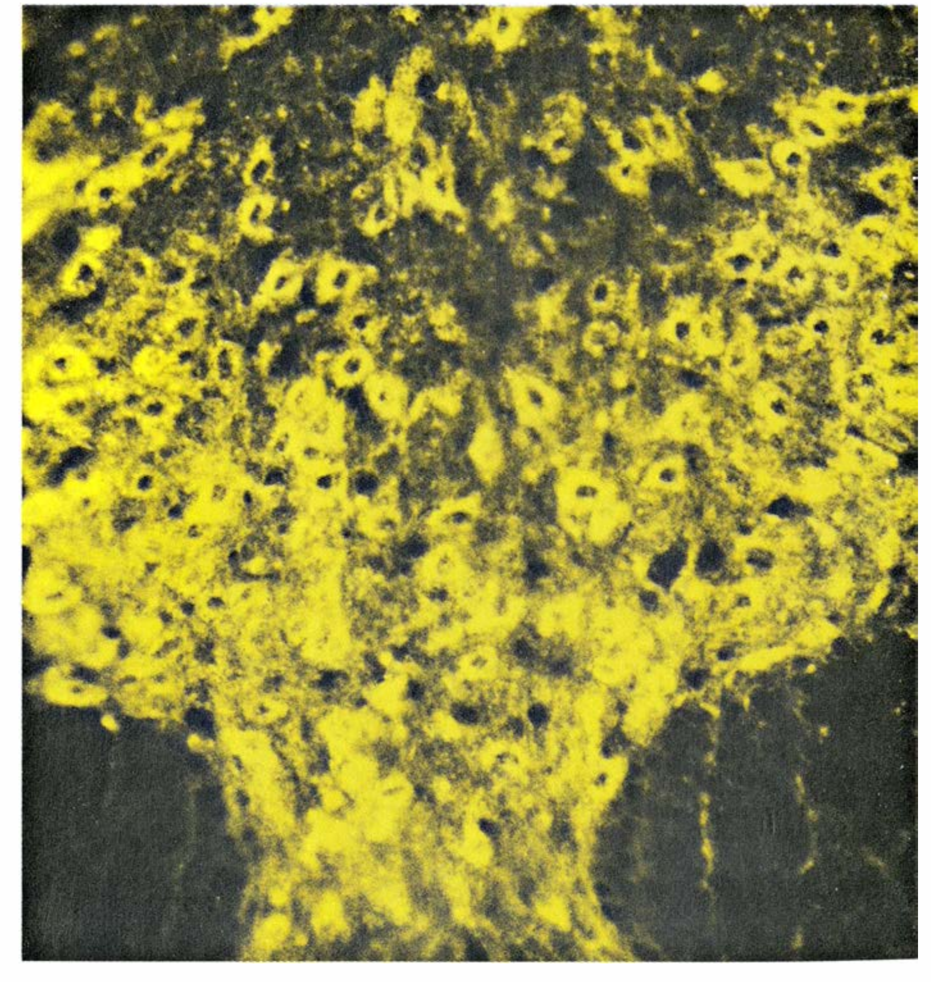
Los datos que recogen la relación entre la ingesta de nutrientes y la neurotransmisión se recabaron cuando se investigaba fenómenos que nadie diría involucrados en el cerebro: los ritmos diarios que atravesaba el metabolismo de los aminoácidos de la dieta. Cuando comemos, la concentración de la mayoría de los aminoácidos (y otros constituyentes del alimento) en plasma sanguíneo cambia de forma predecible en función del tipo de comida que hayamos ingerido. Las personas que se atienen a un horario de comidas estricto acusan unos ritmos diarios muy definidos en lo concerniente a los niveles de aminoácidos plasmáticos. Entre los habitantes de los países desarrollados, que suelen consumir una dieta rica en proteínas, la concentración de leucina en plasma desde las tres de la tarde hasta las tres de la madrugada dobla el nivel observado a lo largo del resto del día. Pero si esa misma muestra ingiriera alimentos carentes de proteínas, bajaría el nivel de leucina hasta la mitad a lo largo de esas horas de digestión y absorción activa. En el primer caso, el incremento representa la entrada, en el torrente circulatorio, de parte de la leucina incorporada en la dieta proteica. En el segundo, el descenso obedece a la secreción de insulina (inducida por los glúcidos ingeridos), que acelera el tránsito de la leucina y la mayoría de los demás aminoácidos desde el torrente circulatorio hasta el músculo estriado.

Hará unos diez años, el autor y sus colegas descubrieron esas variaciones rítmicas e inducidas por la alimentación en los niveles plasmáticos de varias sustancias nutritivas. Nos cuestionamos entonces si tales cambios tenían o no

algún significado funcional. En concreto, nos planteamos si las fluctuaciones de la concentración de sustancias nutritivas en el torrente circulatorio afectaría a la tasa a la que las sustancias nutritivas se convertían en constituyentes de la célula. Para que los cambios de nivel de las partículas alimenticias influyeran en la tasa de conversión, el enzima que catalizara la transformación tenía que poseer una propiedad determinada: el enzima habría de mostrar una capacidad de enlace con la sustancia nutritiva bastante débil, enlace del que resultaría el cambio de estructura química del nutriente; a las concentraciones de alimento usuales, las moléculas enzimáticas no se hallarían completamente saturadas por partículas nutritivas y trabajarían, por ende, por debajo de su máximo rendimiento. En una tal situación, el elemento limitante de la reacción sería la cantidad de alimento que tuviera el enzima a su alcance, de suerte que al elevar la concentración de sustancias nutritivas crecería el nivel de actividad enzimática; vale decir: se metabolizaría mayor cantidad de alimento y se formaría más producto final.

Sabíamos que el triptófano se convertía en serotonina por medio de un enzima de baja afinidad de ésos. La liberación de serotonina por neuronas que tenían su origen en el tronco cerebral desencadenaba señales estimuladoras que alcanzaban a grupos de neuronas, ampliamente distribuidos, que controlaban el sueño, el estado de ánimo y el apetito, entre otras funciones. Otros investigadores habían demostrado lo siguiente: si se administraban grandes dosis de triptófano puro a animales de experimentación, crecía la concentración de serotonina en el cerebro. John D. Fernstrom y el autor decidieron examinar qué posibilidad había de que las oscilaciones normales y dia-



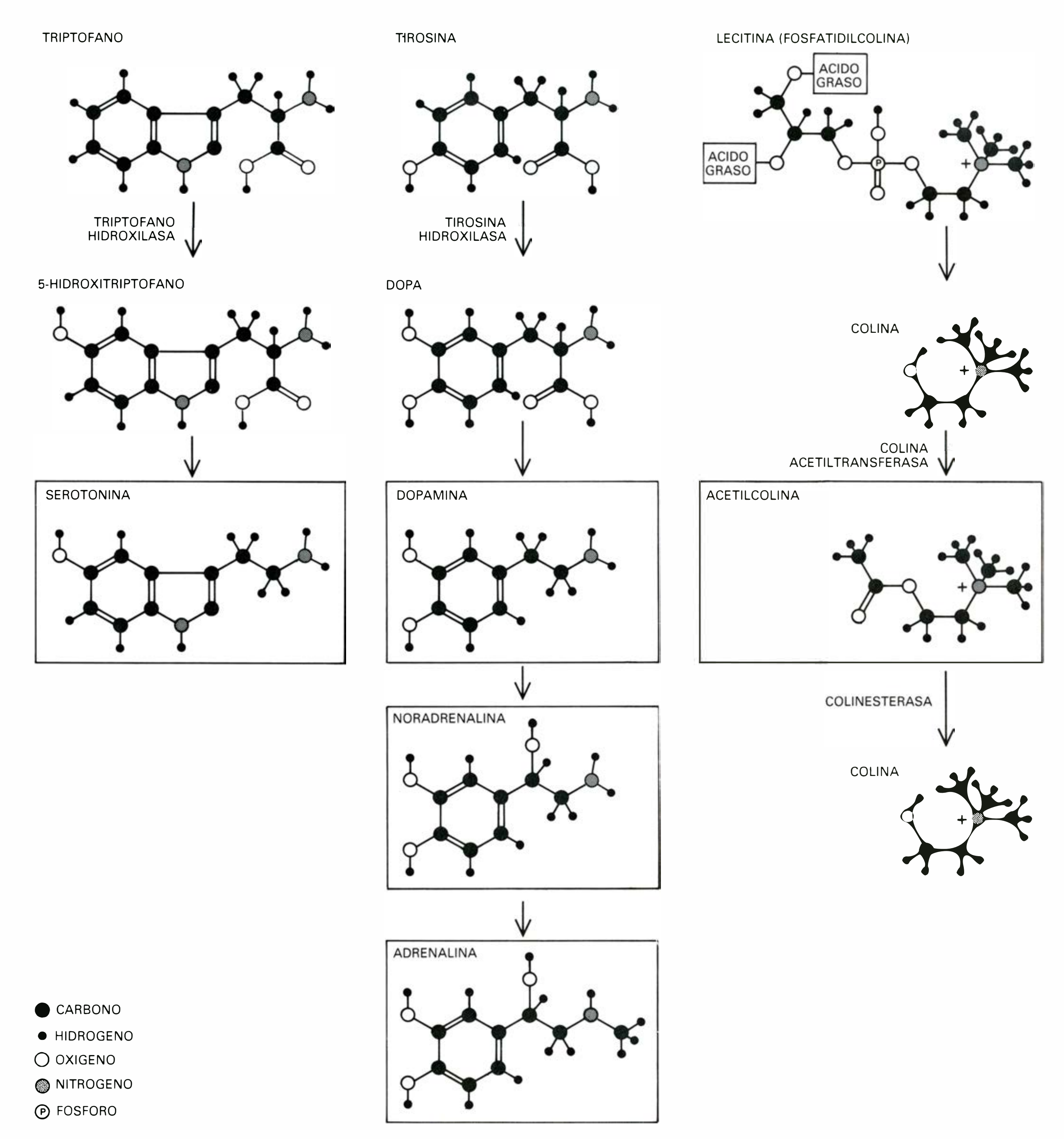


SINTESIS DE SEROTONINA, un neurotransmisor. Su producción aumenta notablemente cuando se administra el aminoácido triptófano, la sustancia nutritiva precursora de la serotonina. Estas micrografías, realizadas por George K. Aghajanian, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, muestran las neuronas (células nerviosas) del núcleo del rafe dorsal de la rata, una de las estructuras donde se sintetiza y almacena la mayor parte de la serotonina cerebral. Secciones finas de tejido cerebral se trataron con formaldehído, el cual reacciona con la serotonina para formar un compuesto fluorescente amarillo verdoso. En la sección control (*fotografía superior*), una débil fluorescencia revela la presencia de serotonina en el citoplasma de los cuerpos celulares y a lo largo de los axones o fibras nerviosas. La otra sección (*abajo*) corresponde al cerebro de un animal al que se le inyectó una elevada dosis de triptófano una hora antes de que se extirpara la muestra de tejido. Se observa un gran incremento en el nivel de fluorescencia, lo que refleja un aumento de la síntesis de serotonina en presencia del precursor adicional.

rias de la concentración plasmática de triptófano bastaran para alterar la tasa de síntesis de serotonina en el cerebro de las ratas.

Para comprobar si una reducción del triptófano plasmático produciría el efecto opuesto, a unas les inyectamos insulina y a otras las sometimos a una dieta glucídica, que inducía la secreción de insulina. Esperábamos que la hormona redujera el nivel plasmático de triptófano, como ocurre con otros aminoácidos, mediante el tránsito de éstos del torrente circulatorio al músculo estriado. Cuál no sería nuestra sorpresa cuando observamos que la insulina no sólo no rebajaba la concentración plasmática de triptófano, sino que aumentaba su concentración en el cerebro, potenciando así la síntesis de serotonina en vez de detenerla. ¿Qué ocurría al alimentarlos con grandes cantidades de proteínas? Otra sorpresa: a pesar de que los aminoácidos abundaban en la dieta, menguaron la concentración cerebral de triptófano y la síntesis de serotonina.

Estas aparentes paradojas se resolvieron cuando encontramos que la cantidad de triptófano disponible en el cerebro para convertirse en serotonina no dependía solamente de la cantidad



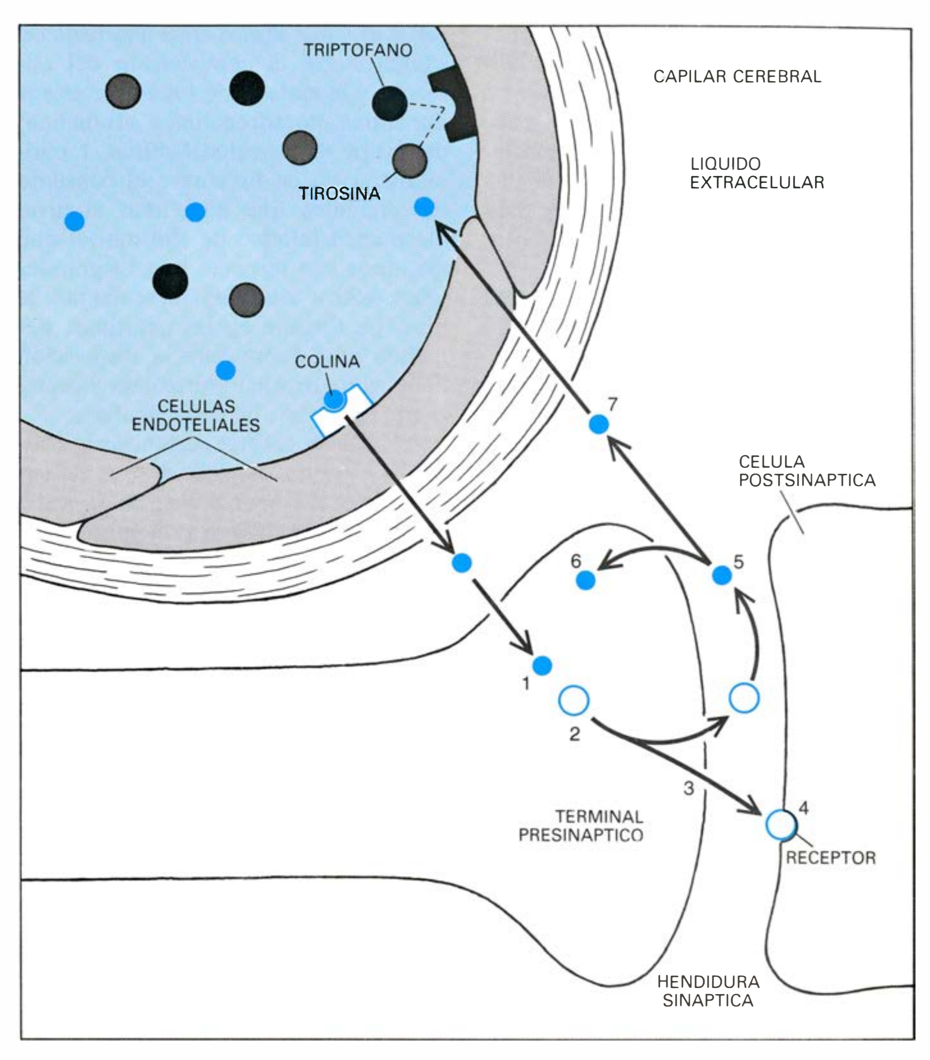
ESTRUCTURAS QUIMICAS de tres sustancias nutritivas, representadas con las vías por las que se convierten en neurotransmisores. El triptófano se convierte en serotonina a través de una doble fase. Los tres transmisores catecolamínicos, la dopamina, la noradrenalina y la adrenalina, se forman en tres etapas sucesivas a partir de otro aminoácido, la tirosina. La lecitina, que forma parte de los alimentos, proporciona la colina, el precursor del transmisor acetilcolina. A diferencia de otros precursores, la colina se recicla; se regenera cuando la acetilcolina se descompone por acción de la colinesterasa.

de triptófano en plasma, sino también de la relación entre el triptófano plasmático y el nivel plasmático de otros cinco aminoácidos: tirosina, fenilalanina, leucina, isoleucina y valina. Los seis aminoácidos son moléculas bastante grandes; la mayoría de ellos, en condiciones fisiológicas, eléctricamente neutros, ya que vienen a tener el mismo número de cargas positivas que de negativas.

Las macromoléculas hidrosolubles encuentran grandes dificultades a la hora de difundirse fuera de los capilares cerebrales y alcanzar las neuronas y otras células cerebrales. Su paso de la sangre al cerebro viene facilitado por moléculas transportadoras que se hallan en las células endoteliales que tapizan los capilares cerebrales. No hay más que un tipo de molécula para transportar los seis grandes aminoácidos neutros a través de la barrera hematoencefálica; los aminoácidos, pues, compiten entre sí para unirse al transportador y saltar así desde el torrente circulatorio hacia el cerebro. En la mayoría de las proteínas abunda menos el triptófano que la tirosina, fenilalanina, leucina, isoleucina o valina. Por consiguiente, una comida con elevado contenido proteico reduce la proporción plasmática de triptófano con respecto a sus aminoácidos competidores; en ese caso se transportará menos triptófano a través de la barrera, y menos triptófano alcanzará las neuronas.

Una comida rica en glúcidos produce el efecto opuesto, ya que la insulina segregada en respuesta a la entrada de hidratos de carbono rebaja más el nivel plasmático de los aminoácidos competidores que el de triptófano. La mayor parte del triptófano se halla unido a la proteína plasmática albúmina, mientras que los otros aminoácidos circulan como moléculas libres; aislado en un depósito de albúmina, el triptófano es prácticamente inmune al efecto de la insulina. En consecuencia, tras la ingestión de glúcidos, la relación plasmática del triptófano con respecto a sus competidores aumenta, incrementándose la cantidad de triptófano que llega a las neuronas.

Quizás estas interacciones, sugerimos entonces, capacitasen a las neuronas liberadoras de serotonina del cerebro para actuar a modo de detectores de la proporción plasmática de triptófano, que incrementaría la liberación de serotonina después de una comida rica en glúcidos y la disminuiría después de una ingestión abundante de proteínas. En este sentido, David Ashley y G. Harvey Anderson, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Toronto, obtuvieron pruebas de que el cerebro utilizaba esa propiedad de las neuronas serotoninérgicas cuando un animal prefería un tipo de alimento a otro. Para concretar los constituyentes específicos del alimento cuya elección estaba influida por la serotonina cerebral, Judith J. Wurtman y el autor ofrecieron a un grupo de ratas la opción de escoger entre dos dietas que tenían distintas proporciones de glúcidos y proteínas. Diversos tratamientos que aumentaban la liberación de serotonina en el cerebro (como la administración del fármaco fenfluoramina) provocaban en las ratas una reducción selectiva de su consumo de glúcidos. Más recientemente pusimos de manifiesto que los tratamientos que incrementan la serotonina ejercen un efecto similar en las personas obesas que gustan de dietas ricas en hidratos de carbono cuando se les permite escoger diversos alimentos durante un período de varias semanas.



LAS MOLECULAS DE LOS ALIMENTOS deben atravesar la "barrera hematoencefálica" para alcanzar las células cerebrales, donde se utilizarán como precursores de los neurotransmisores. Las uniones entre las células endoteliales de los capilares del cerebro, demasiado estrechas, no permiten el paso del triptófano, la tirosina o la colina; los precursores han de atravesar la pared capilar valiéndose de moléculas transportadoras. El triptófano, la tirosina y otros aminoácidos grandes y eléctricamente neutros compiten por un mismo transportador. Se muestra aquí la captación y conversión de la colina. La colina del líquido extracelular del cerebro penetra en el terminal de una neurona colinérgica (*1*) y se convierte en acetilcolina (*2*). La acetilcolina se libera en la hendidura sináptica cuando la neurona descarga (*3*). La acetilcolina puede actuar sobre un receptor y transmitir entonces una señal a la célula postsináptica (*4*), o bien convertirse en colina (*5*), que se reabsorberá nuevamente por el terminal presináptico (*6*) si es que no penetra en el líquido extracelular y el torrente circulatorio (*7*). (Los dibujos son de Alan D. Iselin.)

Se diría, por exponerlo de otra manera, que la ingestión de una comida rica en glúcidos y pobre en proteínas generase un cambio neuroquímico, concretamente un aumento de la síntesis de serotonina, que indujera al animal a reducir su dieta de hidratos de carbono, pero no la de proteínas. Parece probable que este control de la liberación de serotonina por la composición de la dieta, y de la composición de la dieta por la liberación de serotonina, lo haya potenciado la evolución, toda vez que ayuda a mantener el equilibrio nutritivo. Posiblemente evite que el oso se alimente únicamente de miel y que el hombre lo haga sólo de dulces y féculas en detrimento de las proteínas. Al-

gunas personas obesas tienen trastornado ese notable mecanismo de retroalimentación, que relaciona funciones tales como la nutrición, el metabolismo, la neurotransmisión y el comportamiento. Desgraciadamente, no se dispone aún de técnicas no invasivas para la medición de la liberación de serotonina en el cerebro que permitan establecer, de una forma directa, el papel que cumple en el hombre la liberación de serotonina.

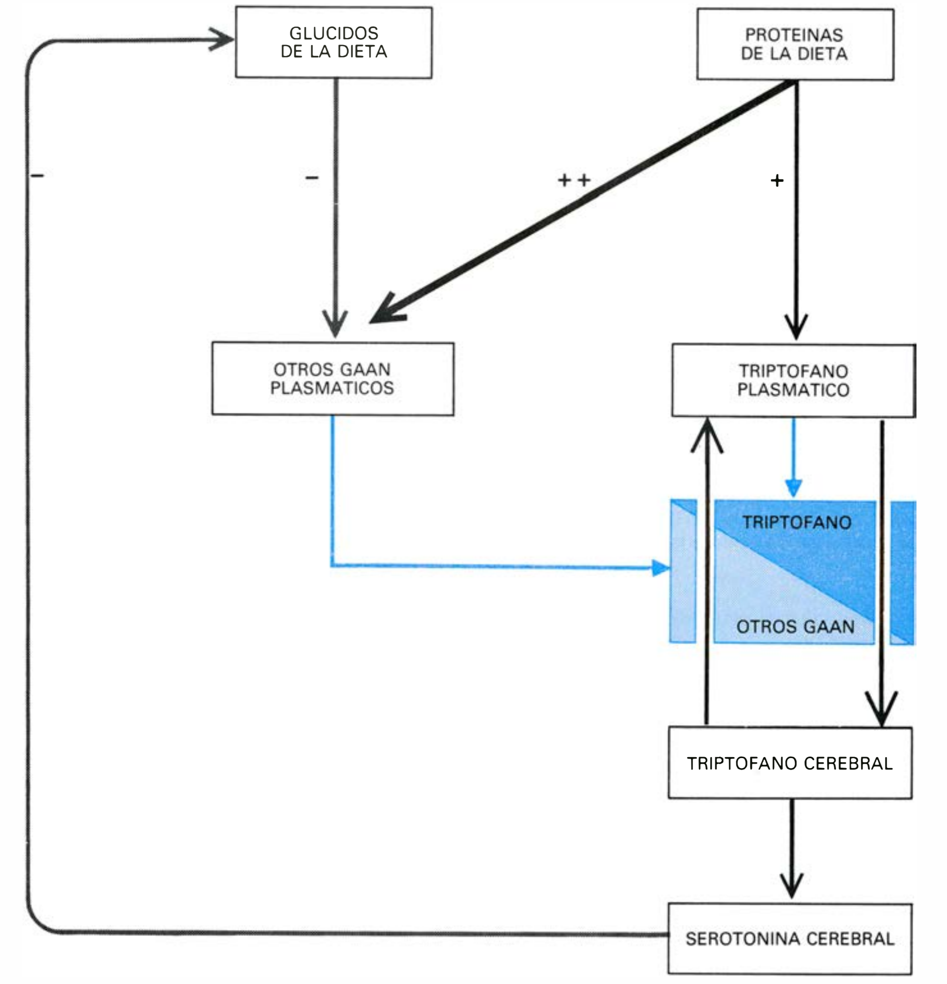
En 1975, Edith L. Cohen y el autor, e independientemente Dean R. Haubrich, del Instituto Merck de Investigación Terapéutica, demostraron que la administración de colina incrementaba la síntesis de acetilcolina en el cerebro. (El consumo de lecitina, que es el constituyente alimenticio que proporciona la mayor parte de la colina en las dietas de adulto, era aún más eficaz.) Poco más tarde, Candace J. Gibson y el autor observaron una relación similar entre la composición del alimento y la síntesis de los transmisores dopamina, noradrenalina y adrenalina, del grupo de las catecolaminas. La administración de tirosina o el consumo de alimentos que aumentan el nivel plasmático relativo de tirosina (el que mantiene con respecto a otros grandes aminoácidos neutros) incrementan el nivel de tirosina en las neuronas, poniendo más aminoácido a disposición del enzima tirosina hidroxilasa y acelerando la síntesis de catecolaminas.

A partir de las tres sustancias nutritivas que condicionan la síntesis de sus productos de neurotransmisión, cabe formularse ya algunos principios generales que nos permitan predecir si un determinado transmisor sufrirá tal control y proponerse modelos de experimentos que den razón de la existencia de esas relaciones. Ilustraré esos principios describiendo la naturaleza de los cinco procesos bioquímicos que deben producirse secuencialmente para que el consumo de una ingesta rica en una sustancia nutritiva incremente, en el cerebro, la síntesis del transmisor cuyo precursor es la sustancia nutritiva.

Primero, el consumo del alimento que contiene la sustancia nutritiva debe elevar significativamente el nivel plasmático de la sustancia nutritiva; los mecanismos de retroalimentación, así los que regulan el *p*H plasmático o la concentración de calcio, no pueden mantener constante el nivel plasmático. Segundo, la concentración de la sustancia nutritiva en el cerebro ha de depender de su concentración plasmática, en razón de la cual variará; no puede haber una barrera hematoencefálica impenetrable para el precursor. Tercero, el mecanismo de transporte que interviene en los movimientos de la sustancia nutritiva entre la sangre y el cerebro será de baja afinidad: no estará saturado con su sustrato (el precursor), de manera que pueda tender hacia la saturación cuando aumente su nivel plasmático. Cuarto, el enzima neuronal que cataliza la conversión del precursor en el transmisor tiene que ser, asimismo, de baja afinidad. (Como mencioné antes, este requisito fue el que nos condujo a esclarecer el efecto que producía el triptófano sobre las neuronas liberadoras de serotonina.) Quinto, el enzima no se hallará sujeto a inhibición por retroalimentación cuando aumente el nivel intracelular de su producto, el transmisor.

Se ha demostrado que todas estas condiciones se cumplen en la síntesis de serotonina, acetilcolina y catecolaminas. Hay pruebas de que esas condiciones las cumplen también otros dos transmisores, la histamina y la glicina, cuya producción parece afectada por la disponibilidad de sus precursores. De la necesidad de satisfacer tantas condiciones para que la disponibilidad del precursor influya sobre la síntesis del neurotransmisor se infiere que la relación precursor-transmisor no es un accidente biológico. Diríase que la relación tiene un valor adaptativo y que, por tanto, se ha conservado a lo largo de la evolución.

¿Se hallan todos los neurotransmisores sujetos a un control por parte del precursor? Probablemente no. Los precursores inmediatos de algunos transmisores están normalmente disponibles a concentraciones que saturan los mecanismos sintetizadores de neurotransmisor; no dependen, pues, de la composición plasmática. En otros casos, no puede evaluarse hasta qué punto los niveles de precursor controlan la síntesis



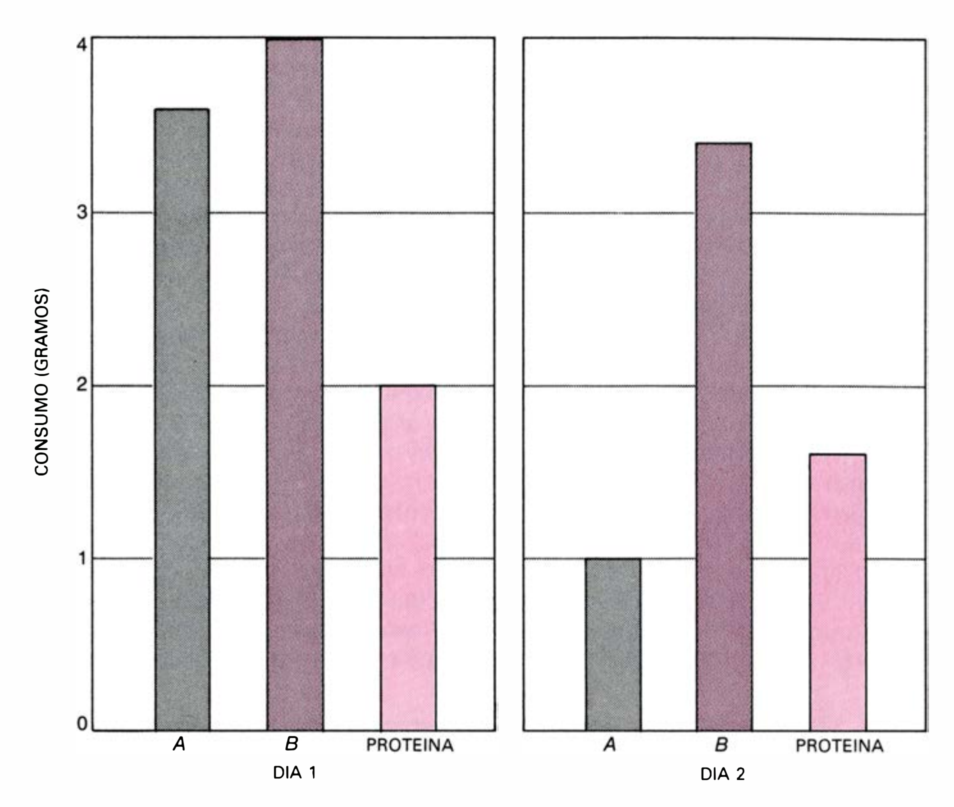
CONSUMO DE ALIMENTO y síntesis cerebral de serotonina. En la ingesta de proteínas sube el nivel plasmático de triptófano, pero más todavía lo hace el de otros cinco grandes aminoácidos neutros (GAAN), puesto que todos ellos poseen una representación mayor en las proteínas que el triptófano. Los glúcidos de la dieta inducen la secreción de insulina, que expulsa a la mayoría de los aminoácidos fuera del torrente circulatorio, aunque apenas incide sobre el triptófano. Puesto que el triptófano debe competir con otros GAAN en el transporte a través de la barrera hematoencefálica, el movimiento del triptófano desde el plasma hasta el cerebro está controlado por la proporción plasmática entre el triptófano y los otros GAAN (*color*). Cuando la proporción es elevada, el triptófano entra en el cerebro; cuando es baja, el triptófano pasa del cerebro a la corriente sanguínea. La liberación de serotonina en el cerebro sintetizada a partir del triptófano parece provocar en ratas (o en personas), una reducción del consumo de glúcidos.

de transmisor, ya sea porque se desconoce la identidad del precursor o porque los sistemas de transporte hematoencefálico anulan los intentos del experimentador de incrementar la concentración de precursor en el cerebro. Sin embargo, aunque sólo algunos de los 25 neurotransmisores conocidos puedan en potencia responder a la ingestión de sustancias nutritivas, merece destacarse que hay entre ellos varios cuya acción modifican los medicamentos que se administran en el tratamiento de enfermedades de carácter neurológico, psiquiátrico y cardiovascular.

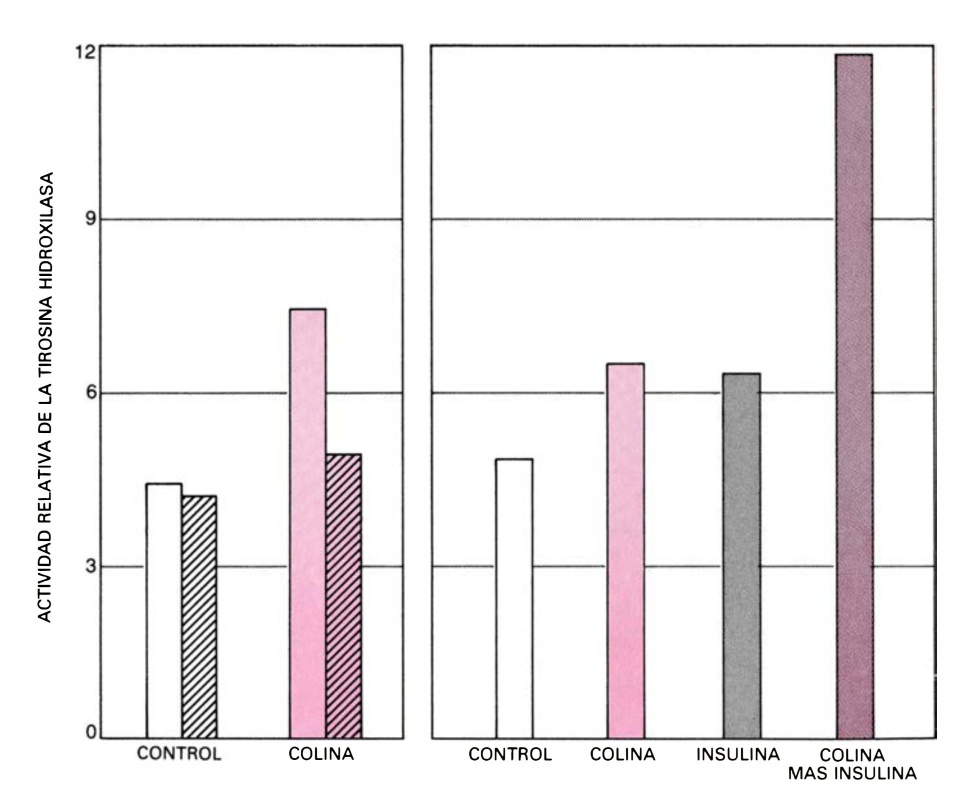
Cierto es que la ingestión de un alimento influye en la síntesis del neurotransmisor en el terminal presináptico de la neurona; pero ello no implica necesariamente que la sustancia nutritiva altere la transmisión de impulsos a través de la sinapsis. Debe demostrarse antes que la sustancia nutritiva aumenta el número de moléculas transmisoras liberadas por un determinado grupo de neuronas por unidad de tiempo. El número de impulsos depende fundamentalmente del número de neuronas que contenga el tracto o nervio examinado, del número total de sinapsis establecidas, de la frecuencia a la que las neuronas descargan y del promedio de moléculas liberadas en cada sinapsis cada vez que la neurona descarga.

No había, pues, dificultades teóricas para admitir que la administración de sustancias nutritivas afectara solamente a la síntesis del transmisor y no a su liberación en la sinapsis. Se demostró que no era así en experimentos realizados por George G. Bierkamper y Alan M. Goldberg, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins. Midieron la liberación de acetilcolina por neuronas motoras incubadas en distintas concentraciones de colina. Al estimular eléctricamente los nervios, observaron un sorprendente paralelismo entre la concentración de colina y la cantidad de acetilcolina liberada.

Avanzando un escalón más en la investigación de la adición de sustancias nutritivas, Ismail Ulus, de la Universidad de Bursa, Turquía, y el autor demostraron que este aumento no sólo mejoraba la liberación de transmisor, sino también la neurotransmisión, provocando un cambio químico en las células postsinápticas. En estos estudios utilizamos nervio esplácnico, que nace en la médula espinal y alcanza las glándulas suprarrenales. En ellas, las fibras nerviosas esplácnicas establecen sinapsis con las células denominadas cromafines, en la médula, o centro, de la glándula. Cuando el nervio esplácnico



EFECTO DE LA SEROTONINA en la elección de alimento. Se demostró en un experimento, realizado por J. J. Wurtwan y el autor, donde las ratas podían elegir entre dos dietas. Cada dieta contenía la misma cantidad de glúcidos y calorías, pero la *A* era baja en proteínas (5 por ciento), mientras que la *B* abundaba en ellas (45 por ciento). Durante el primer día se inyectó un placebo a las ratas. En el segundo día se les inyectó fenfluoramina, fármaco que incrementa la liberación de serotonina. La serotonina adicional produjo una reducción selectiva en la cantidad de alimento consumido de la dieta *A*; descendió así la ingestión de glúcidos, aunque no varió excesivamente la cantidad de proteínas que consumieron los animales.

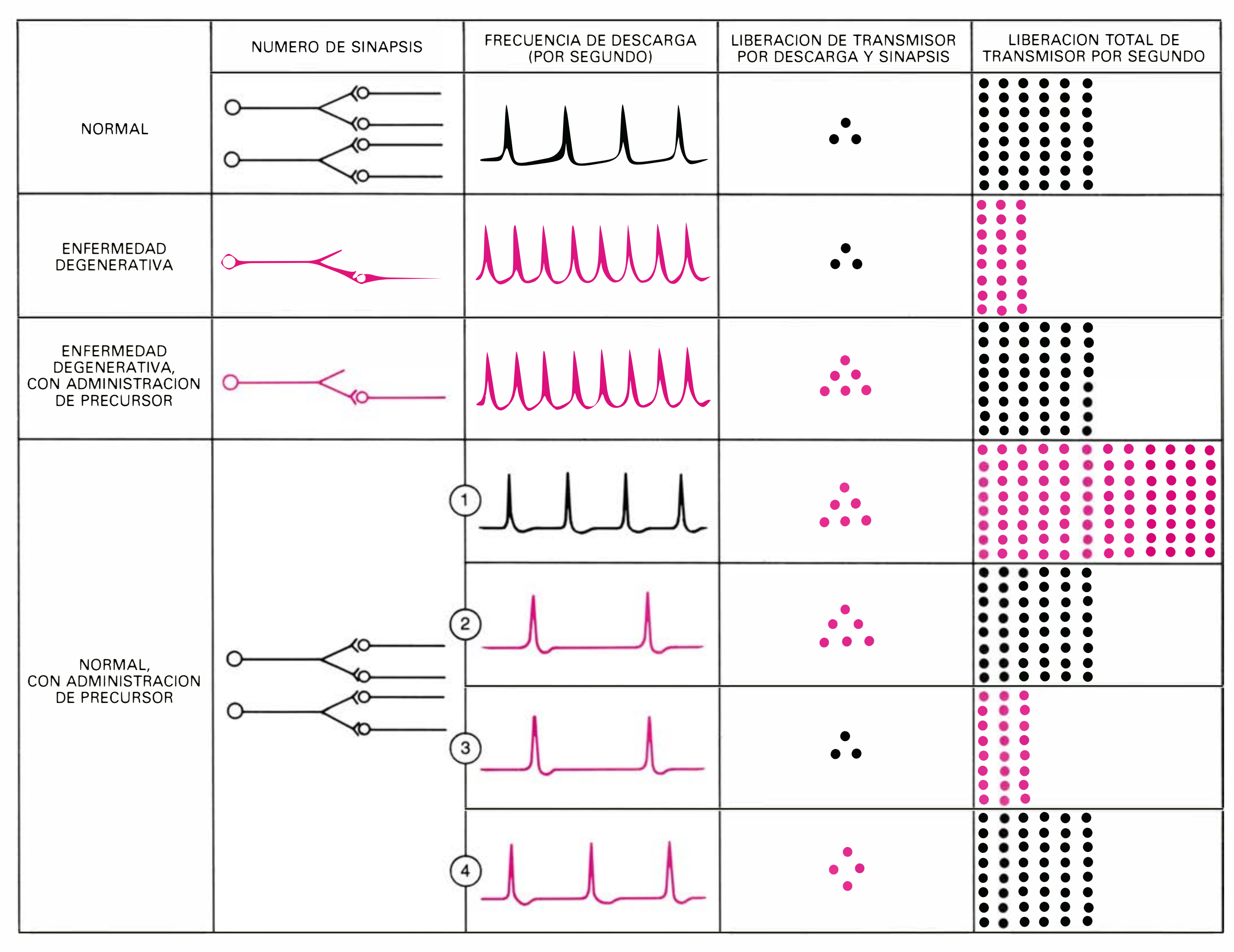


EFECTO DE LA COLINA sobre la transmisión de señales por acetilcolina desde los terminales del nervio esplácnico hasta las células cromafines de la glándula suprarrenal. Se evaluó midiendo la actividad de la tirosina hidroxilasa, enzima cuya síntesis potencia la acetilcolina. En un experimento (*izquierda*) se denervó una de las dos glándulas suprarrenales (*barras con trazo oblicuo*). La administración de colina durante varios días incrementó significativamente la actividad enzimática de la glándula intacta, aunque no la de la denervada. En un segundo experimento (*derecha*) se ensayaron con las ratas dos tratamientos; el primero, con una sola sustancia y el segundo, con varias. Suministrando colina aumentaba la actividad enzimática; al igual que ocurría inyectando insulina, que aceleraba la descarga del nervio esplácnico. Los dos tratamientos se reforzaban entre sí: su efecto combinado doblaba la suma de sus efectos aislados.

descarga, libera acetilcolina. Este neurotransmisor determina que las células cromafines postsinápticas liberen adrenalina y produzcan más tirosina hidroxilasa, el enzima que controla, en última instancia, la síntesis de adrenalina.

Otros investigadores (especialmente Julius Axelrod, Hans Thoenen y Robert A. Mueller, a la sazón todos ellos en el National Institute of Mental Health) pusieron de manifiesto que, si se sometía a ratas a un tratamiento que aumentaba crónicamente la frecuencia de descarga del nervio esplácnico, la consecuente liberación adicional de acetilcolina incrementaba el nivel de actividad de la tirosina hidroxilasa en la glándula suprarrenal. Sugerimos que administrando colina aumentaría la cantidad de acetilcolina liberada por descarga sin alterarse la frecuencia de descarga del nervio esplácnico y, por consiguiente, se incrementaría de forma parecida la actividad de la tirosina hidroxilasa. Así fue. Experimentamos luego con animales a los que habíamos seccionado las fibras nerviosas esplácnicas que inervaban una de las dos glándulas suprarrenales. La colina inducía una mayor actividad enzimática en la glándula intacta, mientras que en la denervada no presentaba ningún efecto, demostrándose así que la colina circulante no actuaba directamente; primero debía convertirse en acetilcolina, que liberaba el nervio esplácnico.

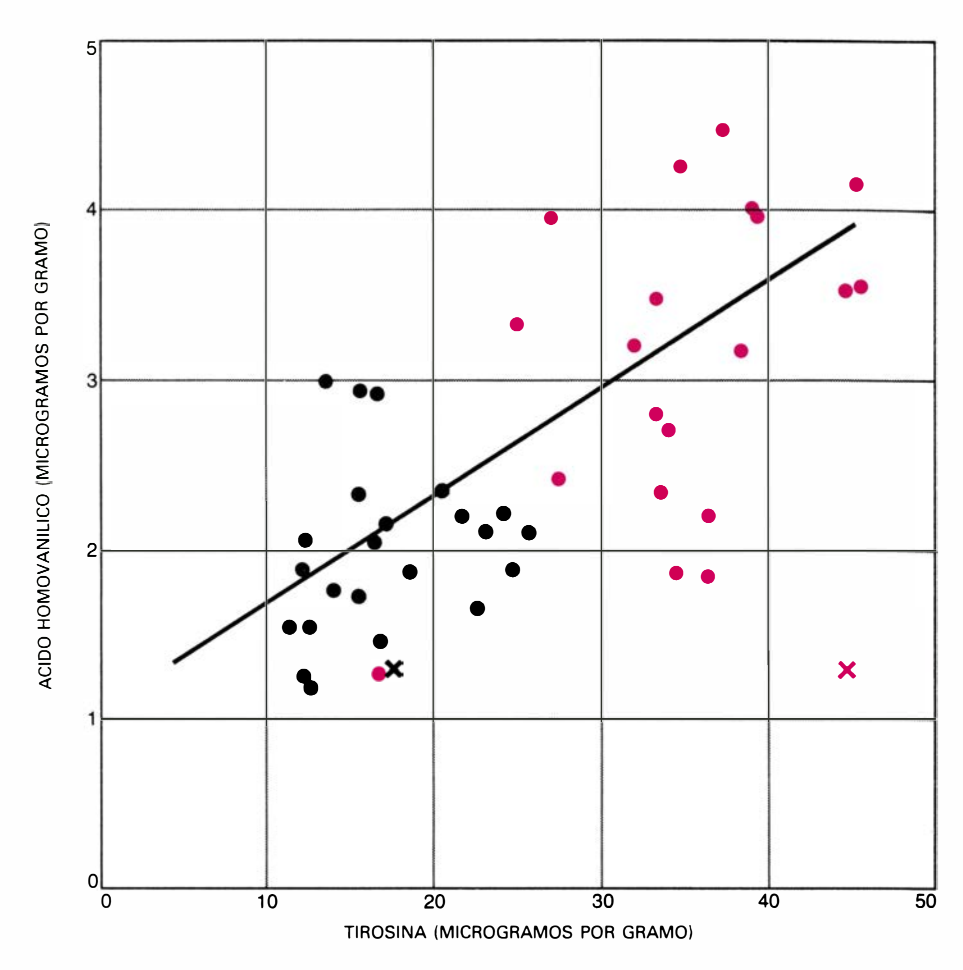
Para confirmar que la colina actuaba variando la cantidad de neurotransmisor liberado por descarga (y no alterando la frecuencia de descarga) acometimos un ensayo mixto: administramos colina a las ratas y recurrimos a un tratamiento destinado a acelerar las descargas del nervio esplácnico. (Los tratamientos incluían la colocación de los animales en un ambiente frío, la administración de grandes dosis de insulina y de medicamentos que les producían prolongados descensos de la presión sanguínea.) Pensamos que si tanto la colina como el otro tratamiento actuaban aumentando la frecuencia de descarga, su efecto combinado sobre la tirosina hidroxilasa vendría a coincidir con el producido por un solo tratamiento. Mas si la colina incrementaba la cantidad de acetilcolina liberada por descarga, el efecto combinado debería ser multiplicativo. Observamos que los efectos de la administración de colina y del segundo tratamiento eran realmente multiplicativos. Pero no sólo eso. Para nuestra sorpresa, los dos tratamientos se potenciaban también mutuamente, es decir, su efecto combinado sobre la actividad de la tirosina hi-



RELACION entre la frecuencia de descarga y el suministro de precursor. En la parte superior de la figura se muestra un hipotético grupo de cuatro sinapsis normales; las neuronas descargan cuatro veces por segundo; en cada sinapsis se liberan tres moléculas de transmisor por descarga. Una hipotética enfermedad reduce el número de neuronas y sinapsis. Las restantes neuronas descargan más rápidamente, pero la liberación de transmisor resulta todavía insuficiente. La administración de precursor adicional aumenta el número de moléculas de transmisor liberadas en cada descarga, alcanzándose una tasa de liberación normal. Si se suministra precursor adicional a un grupo normal de neuronas obtenemos una respuesta diferente. En primer lugar, hay un incremento transitorio en la liberación total, puesto que se sintetiza más transmisor, pudiéndose liberar más cantidad en cada descarga (*1*). Pronto, sin embargo, baja la frecuencia de descarga de las neuronas, reduciéndose la liberación de transmisor al nivel normal (*2*). La reducción del número de descargas, a su vez, disminuye la sensibilidad neuronal al precursor adicional, por lo que se libera menos transmisor por descarga (*3*). Finalmente se alcanza una combinación de frecuencia de descarga y liberación por descarga que mantiene normal el ritmo neuronal de liberación de transmisor (*4*).

droxilasa era mayor que el producto de sus efectos cuando éstos se administraban independientemente.

Estos experimentos nos condujeron a dos conclusiones. Primera: el suministro de una molécula nutritiva que actuaba de precursor mejoraba la liberación del neurotransmisor y, por ende, reforzaba el efecto de una neurona en las células postsinápticas. En el caso estudiado, la administración de colina provocaba un aumento de la liberación de acetilcolina y, por tanto, mayor actividad de la tirosina hidroxilasa. La segunda conclusión, que no habíamos imaginado, era que la magnitud del efecto de la colina variaba con la frecuencia de descarga de la neurona sobre la que actuaba. Este último descubrimiento constituía el primer indicio de una importante relación, mencionada al principio, entre la frecuencia de descarga de la neurona y el grado con que ésta responde a un mayor suministro del precursor de su transmisor.



LA ADMINISTRACION DE TIROSINA conduce a la acumulación de ácido homovanílico, un producto de degradación de la dopamina, en el cuerpo estriado de la rata, pero sólo cuando se acelera la descarga de las neuronas liberadoras de dopamina. Administrando únicamente tirosina (X *de color*) aumenta la concentración de tirosina en el cerebro, comparada con el nivel de los animales control (X *en negro*), aunque no incide en la liberación de dopamina (medida por el nivel de ácido homovanílico). Dando haloperidol, fármaco que acelera la descarga de las neuronas, se facilita la liberación de dopamina y se consigue que la síntesis y liberación de dopamina dependan del nivel cerebral de tirosina (*círculos negros*); una administración de tirosina incrementará entonces la liberación de dopamina (*círculos de color*).

A los cuatro meses de la publicación de nuestro primer artículo sobre el aumento de acetilcolina en el cerebro de ratas a las que se había dado colina, se informaba de la primera aplicación clínica de la relación alimento-neurotransmisor. La comunicación se refería a un paciente que sufría disquinesia tardía, enfermedad caracterizada por movimientos incontrolables de la cara y de la parte superior del cuerpo. Débese (en una fracción notable de pacientes) a la administración prolongada de medicamentos antipsicóticos; muchos psiquiatras la consideran el más importante de los efectos secundarios que limitan el uso de esos medicamentos.

Kenneth L. Davis y sus colegas, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, observaron que si administraban fisostigmina a los pacientes, medicamento que incrementa los niveles de acetilcolina (por bloqueo de la degradación del transmisor por el enzima colinesterasa) se producía una mejoría temporal de los movimientos anormales. Comprobaron luego que un aumento de la acetilcolina cerebral por medio de la administración de colina producía un efecto similar. De entonces acá, otros investigadores han confirmado la eficacia de la colina en muchos pacientes con disquinesia tardía, incluyendo a un numeroso grupo tratado en un ensayo de doble ciego, con placebo controlado, realizado por mi colaborador John H. Growdon, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Tufts.

La colina se ha sustituido en buena parte por la lecitina como precursor de elección para incrementar los niveles de acetilcolina en los pacientes, ya que es menos susceptible a la degradación bacteriana en el intestino. La degradación consume colina y conduce además a la formación de trimetilamina, que confiere un aroma de pescado podrido al desventurado paciente. Desgraciadamente, médicos y bioquímicos aplican el término "lecitina" a un solo compuesto químico, la fosfatidilcolina, mientras que en la industria alimentaria comprende toda una familia de sustancias, los fosfátidos. Tan sólo la fosfatidilcolina vale como fuente eficaz de colina. Los preparados de lecitina de las tiendas de "alimentos naturales" distan mucho de ser puros para incidir de forma apreciable en los pacientes.

La administración de colina o lecitina no bloquea los efectos terapéuticos de los medicamentos antipsicóticos; actúa contra sus efectos secundarios, como la disquinesia tardía. Mas, a diferencia de la fisostigmina y otros inhibidores de la colinesterasa, la colina y la lecitina no producen los efectos secundarios que van asociados al aumento de la propia actividad de la acetilcolina. El incremento en la transmisión de acetilcolina que sigue a la administración de fisostigmina, por ejemplo, da lugar a una excesiva formación de moco en el tracto respiratorio, un fuerte descenso de la frecuencia cardíaca, calambres gastrointestinales y numerosas alteraciones de la función cerebral. ¿Qué es lo que explica la ausencia de tales efectos secundarios colinérgicos a raíz de la administración de lecitina o colina?

La respuesta se remonta a la interdependencia entre la frecuencia de descarga y la síntesis de neurotransmisor [*véase la ilustración de la página anterior*]. No todas las neuronas que en potencia son capaces de liberar más moléculas de transmisor en presencia de una cantidad superior de precursos lo hacen en realidad. El cerebro puede determinar que grupos de neuronas que funcionan normalmente disminuyan su frecuencia de descarga, de suerte que, aunque sinteticen más moléculas de transmisor, no liberen una cifra mayor

de moléculas por unidad de tiempo. La disminución de la frecuencia de descarga produce un segundo efecto; reduce la sensibilidad de las neuronas de baja descarga a la presencia de precursor adicional. En la disquinesia tardía, las neuronas que suprimen los síntomas parecen sensibles a ese suministro adicional de colina, con lo que su acción se amplifica. Otras neuronas colinérgicas primero enlentecen su descarga y luego dejan de responder a la colina adicional; su liberación de acetilcolina no se incrementa y no aparecen los efectos secundarios asociados con una gran estimulación de las neuronas colinérgicas.

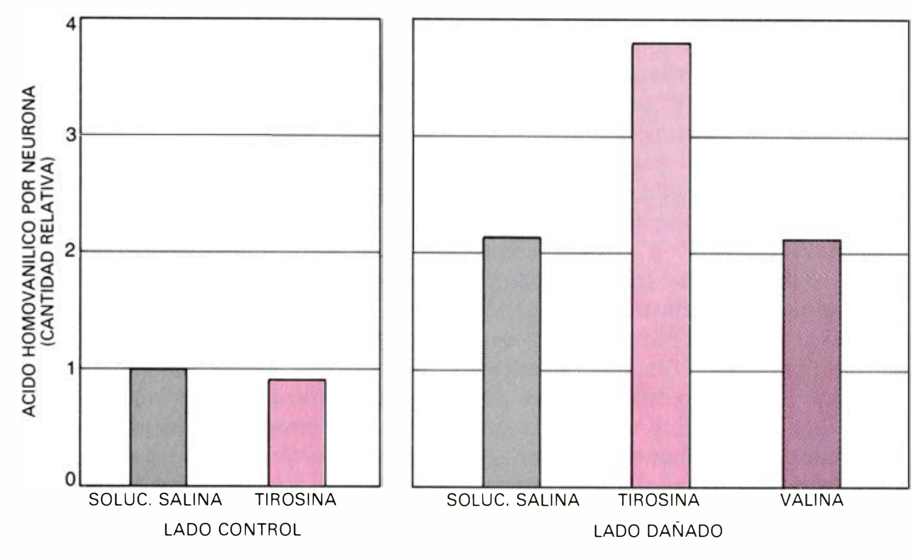
Cualquier estado patológico que resulte de una inadecuada neurotransmisión colinérgica, no importa dónde ello ocurra, puede someterse a un tratamiento con lecitina, administrada sola o junto a otros productos terapéuticos. En numerosos casos se ha descrito una mejoría tras la administración de lecitina en pacientes que sufrían esas enfermedades. Sin embargo, excepto en el caso de la disquinesia tardía, es muy poca la información disponible para mantener conclusiones, por provisionales que sean, acerca de la eficacia terapéutica de la lecitina.

Las enfermedades que en la actualidad ofrecen mayor interés para aplicar en ellas la terapia con lecitina son las alteraciones de la memoria asociadas con la vejez. El envejecimiento lleva consigo una pérdida de neuronas en el cerebro; en particular, las neuronas colinérgicas parecen más vulnerables. El hipocampo, región del cerebro conocida por su papel decisivo, en la formación de recuerdos recientes, abunda en neuronas colinérgicas. La administración a individuos jóvenes de fármacos tales como la escopolamina, inhibidor de la transmisión colinérgica, produce unas alteraciones en la memoria a corto plazo similares a las observadas en las personas de edad avanzada. Así las cosas, parece verosímil que los tratamientos dirigidos a incrementar la acetilcolina cerebral sean eficaces en algunos pacientes con trastornos de la memoria.

Los investigadores que desean estudiar las posibles terapias para estas enfermedades han de enfrentarse a numerosos problemas. Uno de ellos es la falta de base clínica para clasificar a los pacientes con alteraciones de memoria en distintos grupos, según el origen de sus trastornos. Parece probable que la población de pacientes que se agrupan ahora bajo la afección de demencia senil, o enfermedad de Alzheimer, algún día se repartirán entre patologías distintas, de las que quizá sólo algunas presenten un descenso específico en la acetilcolina cerebral susceptible de corrección con una terapéutica a base de colina. De momento, no hay manera de aislar grupos de pacientes.

La falta de pruebas o ensayos bien planteados para cuantificar la mejoría experimentada en el funcionamiento de la memoria constituye otro problema. Se dispone de tests de memoria objetivos, pero en ningún caso ha podido demostrarse que una mejoría en el resultado de una prueba anuncie una mejoría del funcionamiento de la memoria en la vida real del paciente. El ensayo no ha podido validarse (nos hallamos ante un círculo vicioso) porque aún no se ha descubierto ningún tratamiento que mejore a ojos vista el funcionamiento real de la memoria. Además, las sustancias que tenemos a nuestro alcance para los ensayos no resultan satisfactorias. La mayoría de las preparaciones parcialmente purificadas de lecitina contienen muy poca fosfatidilcolina, ni hay quien se las tome a las dosis necesarias, que parecen ser enormes. Los fármacos habituales con los que los investigadores mejoran la función colinérgica en los animales carecen de especificidad sobre cualquier sinapsis colinérgica (por lo que producen excesivos efectos secundarios) para que puedan ensayarse en humanos.

Los pocos casos en que se han descrito respuestas en la memoria de pacientes a los que se había suministrado lecitina sugieren que ésta quizá sea útil en ciertos ejemplos, pero no constituyen en absoluto la "fuente de la juventud". Tal vez la combinación de lecitina con fármacos que aceleran la descarga de las neuronas colinérgicas en el hipocampo o con dosis bajas de inhibidores de la colinesterasa sirva para el tratamiento de quienes sufren trastornos de la memoria atribuibles a un déficit colinérgico localizado. Actualmente, Growdon y Suzanne H. Corkin, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, están experimentando varias de esas combinaciones.



EFECTO DE LA FRECUENCIA DE DESCARGA sobre la liberación de dopamina. Se puso de manifiesto a raíz de un experimento en el que se destruyó el 75 por ciento o más de las neuronas liberadoras de dopamina de un lado del cerebro de la rata, lo que estimuló a las restantes neuronas a descargar más rápidamente. La inyección de tirosina, en sustitución de una solución salina supuestamente inerte, tampoco cambió significativamente la cantidad de dopamina liberada por la neurona en el lado intacto del cerebro. En el lado dañado era patente el incremento de la tasa de descarga de las neuronas supervivientes; en animales a los que se les suministró una solución salina la cantidad de dopamina liberada por neurona resultó aproximadamente el doble. Suministrando tirosina se consigue un incremento mayor de la liberación de dopamina; cosa que no ocurre administrando valina, que es otro gran aminoácido neutro.

La estrecha relación que media entre la frecuencia de descarga de la neurona y su respuesta a un aumento del precursor del transmisor queda bien representada por un grupo de neuronas liberadoras de dopamina que discurren desde la sustancia negra, en el mesencéfalo, hasta el cuerpo estriado, en el interior de cada hemisferio cerebral. Estas neuronas negroestriadas participan en el control (en el inicio, particularmente) de los movimientos y sufren graves daños en el curso de la enfermedad de Parkinson.

¿Cómo estimar la liberación de dopamina por las neuronas negroestriadas en los animales? Determinando, en el cuerpo estriado, la acumulación de un metabolito de la dopamina, el ácido homovanílico. Si se administra tirosina, sustancia precursora de la dopamina, incluso a grandes dosis, a un animal no sometido a tratamiento alguno, no se apreciará cambio en la concentración de ácido homovanílico del cuerpo estriado. Sin embargo, si los animales

han sido tratados previamente con un fármaco que acelera las descargas de las neuronas negroestriadas, la liberación de dopamina se tornará sensible al nivel que haya de tirosina.

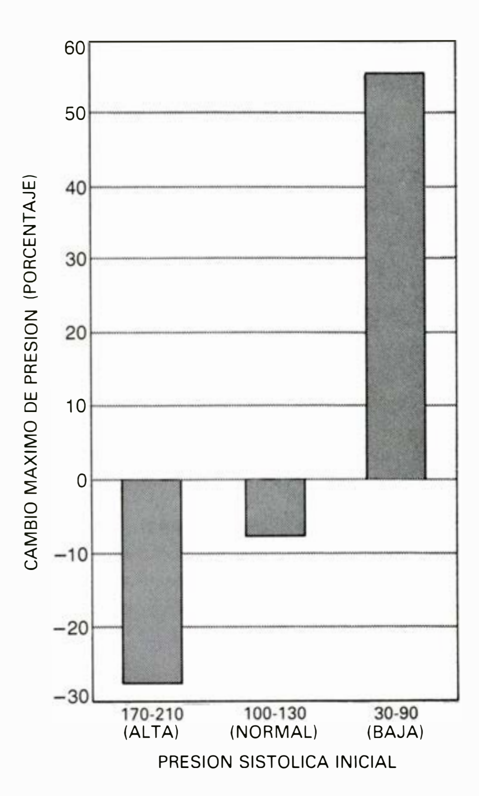
Este efecto tuvo una elegante demostración en el trabajo de Franz Hefti y Eldad Melamed (quienes a la sazón colaboraban en un laboratorio del MIT, y hoy están adscritos a los Laboratorios de Investigación Sandoz, de Basilea, y a la Facultad de Medicina de la Universidad Hebrea de Jerusalén, respectivamente). A través de la administración de una forma modificada de dopamina, que dañaba las neuronas dopaminérgicas, lograron inutilizar más del 75 por ciento de las neuronas negroestriadas de uno de los hemisferios cerebrales de la rata. Las neuronas supervivientes en el hemisferio dañado respondieron aumentando su frecuencia de descarga; probablemente algún mecanismo de retroalimentación capacitaba a las neuronas negroestriadas a realizar también la función de las neuronas dañadas. (Un proceso compensatorio similar evita que la mayoría de los que padecen la enfermedad de Parkinson manifiesten los síntomas hasta que han perdido alrededor de la mitad de sus neuronas negroestriadas.) El incremento de frecuencia de descarga se confirmó al comprobar que el nivel de ácido homovanílico por neurona superviviente en el lado dañado del cerebro superaba, de lejos, al del lado intacto. Se suministró luego a los animales tirosina, apareciendo un posterior incremento en el nivel de ácido homovanílico por neurona en el lado dañado; en el lado intacto no se registró elevación alguna.

La tirosina de la dieta aumentará la síntesis de noradrenalina o la dejará intacta según sea la frecuencia de descarga de las neuronas afectadas. Esta propiedad explica el extraordinario efecto de la tirosina sobre la presión sanguínea. Cuando se administra tirosina a animales (o personas) con presión sanguínea normal, no manifiesta un efecto consistente sobre la presión. Sin embargo, cuando se administra a ratas hipertensas, desciende notablemente su presión sanguínea; cuando se da a animales hipotensos (animales en colapso, por ejemplo), aumenta su presión sanguínea alcanzando valores próximos a los normales. Estas observaciones las realizaron mis becarios Alan F. Sved, Lydia Conlay y Timothy J. Maher, quienes trabajaban con ratas genéticamente hipertensas y con otras cuya presión sanguínea se había reducido por disminución de su volumen sanguíneo en un 20 por ciento, aproximadamente.

En un animal hipertenso, para reducir la presión sanguínea, el cerebro incrementa la descarga de las neuronas liberadoras de noradrenalina del tronco cerebral. Aquí, la noradrenalina actúa de neurotransmisor inhibidor: suprime la descarga de otras neuronas, disminuyendo, en última instancia, la actividad de las neuronas simpáticas periféricas y de las células cromafines de la médula suprarrenal. Las neuronas simpáticas y las células cromafines, por consiguiente, liberan menos noradrenalina y adrenalina, evitando que éstas aumenten la presión sanguínea, por constricción de los vasos sanguíneos, y el gasto cardíaco. Puesto que son solamente las neuronas del tronco cerebral las que descargan repetidamente, su efecto inhibidor será el único aumentado por la administración de tirosina, con lo cual la presión sanguínea descenderá. Por otro lado, en los animales sometidos a choque, el cerebro actúa aumentando la presión sanguínea: se inactivan las neuronas inhibidoras del tronco cerebral que liberan noradrenalina, mientras que se estimula el aumento de la frecuencia de descarga de las neuronas simpáticas y las células cromafines. En este caso, la tirosina mejora selectivamente la liberación de catecolaminas en dichas células, lo que resulta en una elevación de la presión sanguínea.

Merced a ese mecanismo regulador, la tirosina presenta una ventaja teórica con respecto a muchos medicamentos prescritos actualmente en el tratamiento de los trastornos circulatorios. En teoría, al menos, se puede suponer que ésta actúa sin extralimitarse, puesto que, en cuanto se alcanza la presión normal, los cambios específicos en las frecuencias de descarga neuronales tornan al animal insensible a los efectos de nueva tirosina. Pero ésta no se ha ensayado sistemáticamente todavía en pacientes con hipertensión o tras alteraciones circulatorias bruscas; y los razonamientos teóricos no pueden sustituir la eficacia y seguridad que proporcionan los ensayos clínicos.

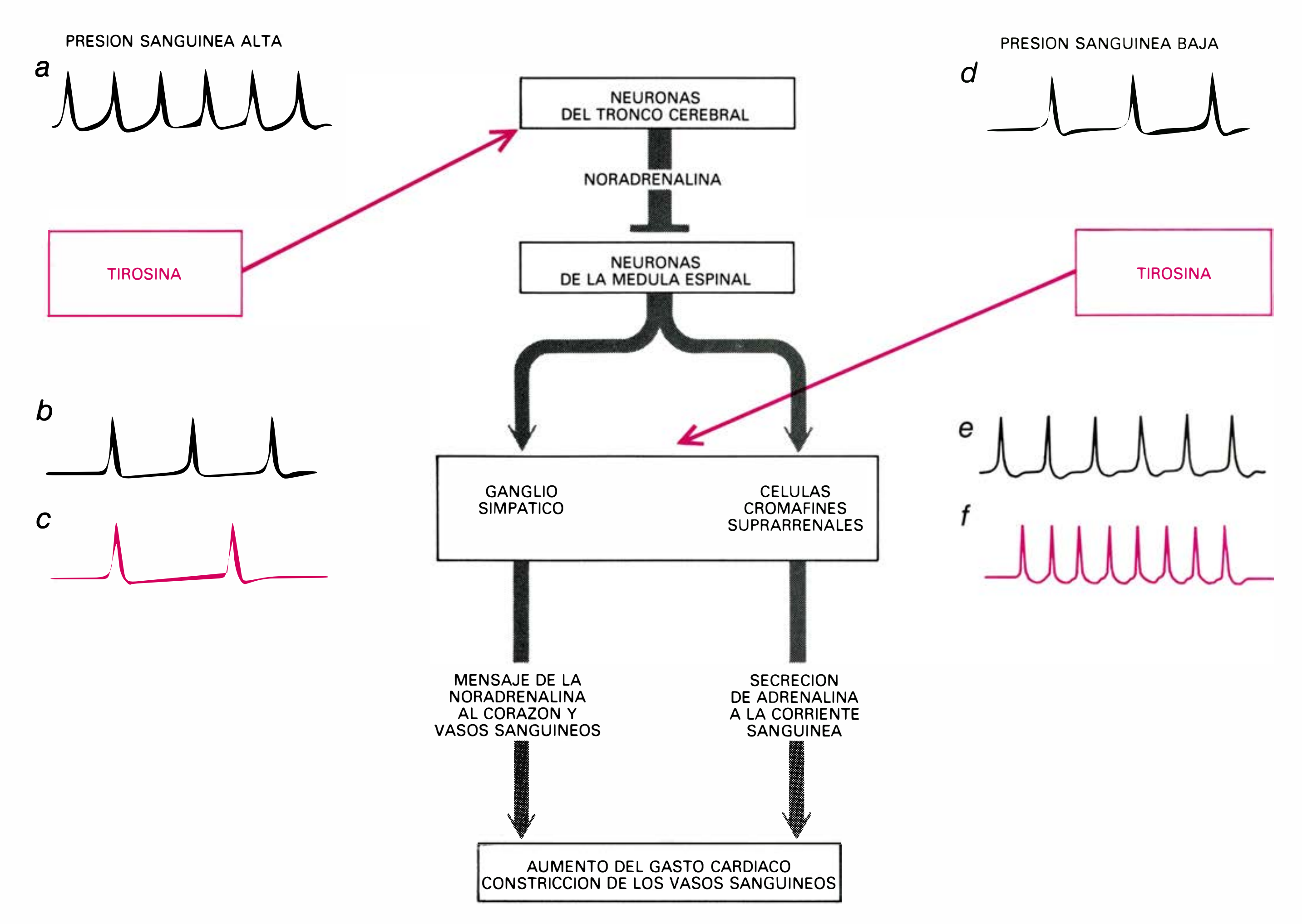
La depresión es otra enfermedad humana en la que la tirosina encierra un posible interés terapéutico. Hay varios centros dedicados a su estudio. La mayoría de los psiquiatras que buscan una explicación bioquímica a la enfermedad mental piensan que, en muchos pacientes, la depresión refleja una neurotransmisión inadecuada, donde la noradrenalina o la serotonina se hallan implicadas. Si los pacientes afectos de depresión presentan una liberación de noradrenalina inadecuada en ciertas regiones del cerebro, cabría pensar que la administración de tirosina les resultara beneficiosa. Las primeras pruebas de



EFECTO DE LA TIROSINA sobre la presión sanguínea. Depende de la presión arterial inicial. El aminoácido disminuye la presión sanguínea en ratas hipertensas y la eleva en animales hipotensos.

que la tirosina podía producir un efecto antidepresivo se obtuvieron en los estudios que realizamos en colaboración con Alan J. Gelenberg, del Hospital General de Massachusetts; nuestros hallazgos recibieron rápida confirmación en otros centros. Si ensayos clínicos del futuro demuestran que la tirosina puede ser útil en el tratamiento de la depresión, valdrá la pena descubrir cómo lo logra. ¿Sufren los pacientes que responden a la tirosina de algún fallo en el metabolismo del aminoácido (que hace que la proporción de tirosina plasmática sea muy baja), o radica el fallo en la conversión de tirosina en noradrenalina en las neuronas del cerebro?

Si a un paciente se le administran dosis elevadas de una sustancia nutritiva, separada de los demás componentes del alimento del que generalmente proviene, para tratar específicamente una enfermedad o estado, ¿podemos considerar que la sustancia nutritiva es un medicamento? La pregunta no afecta sólo a la nomenclatura. La respuesta puede determinar que esos compuestos se ensayen adecuadamente para comprobar su seguridad y eficacia terapéuticas y, en el caso de que pasen las pruebas, si pueden utilizarse con aplicación clínica. Su calificación como medicamentos puede dar lugar a que los organismos reguladores exijan ensayos preliminares tan dificultosos y costosos



CAPACIDAD DE LA TIROSINA para reducir la presión sanguínea alta y subir la presión sanguínea baja. Se explica por el efecto que ejerce el aminoácido sobre diferentes poblaciones de células. En respuesta a la presión sanguínea alta, las neuronas liberadoras de noradrenalina del tronco cerebral aceleran su descarga (*a*). El efecto de la noradrenalina liberada por estas neuronas es inhibidor: reduce la descarga de las neuronas preganglionares del sistema nervioso simpático de la médula espinal, lo que, a su vez, reduce la actividad de las neuronas de los ganglios simpáticos y de las células cromafines suprarenales (*b*), actividad que normalmente tiende a mantener o elevar la presión sanguínea. Cuando se administra tirosina, ésta pone en acción a las neuronas de descarga rápida del tronco cerebral, que producen más noradrenalina; su efecto inhibidor aumenta (*c*) y la presión sanguínea desciende. Por otro lado, en respuesta a la presión sanguínea baja se suprime la descarga de las neuronas del tronco cerebral (*d*); resulta de ello una reducción de su efecto inhibidor y un aumento de la actividad de los ganglios y células suprarrenales (*e*). Ahora son las células cromafines y simpáticas de elevada actividad las que se muestran sensibles a un incremento de la tirosina si se administra el aminoácido. Su actividad se intensifica aún más (*f*) y la presión sanguínea sube.

que asusten a algunos de sus fabricantes más probables: las compañías de productos alimentarios que elaboran lecitina y constituyentes proteicos como aditivos en la industria alimentaria.

Obviamente, la prescripción de esas sustancias por los médicos (o la recomendación para su uso en automedicación) debe esperar a que se disponga de pruebas suficientes de su seguridad y eficacia. ¿Acaso deben ser los criterios aplicados a un constituyente omnipresente en el alimento tan rigurosos como los que se aplican para legitimar a un fármaco? Probablemente no, por numerosas razones. Los aminoácidos y la colina se metabolizan rápidamente en el cuerpo por los enzimas que lo han venido haciendo desde que aparecieron los animales sobre nuestro planeta. La forma en que se metaboliza una determinada molécula de una de esas sustancias nutritivas no parece depender de la vía por la que se ingirió: como sustancia pura o como componente de un alimento proteico o de la lecitina. Los precursores son solubles en agua y, por difusión, se distribuyen rápidamente por la corriente sanguínea y diferentes tejidos (o, en el cerebro, por un sistema de transporte); su concentración tisular, a diferencia de la concentración de muchos medicamentos, no asciende de forma continuada con administraciones repetidas. Además, y quizá revista ello más importancia, el cerebro debe consentir, por decirlo así, en la mayoría de sus efectos sobre la neurotransmisión, ya que gracias a la respuesta selectiva de las neuronas a una cantidad adicional de precursor el cerebro modula los efectos del precursor.

La cantidad de estas sustancias nutritivas que debe administrarse para modificar la síntesis de neurotransmisor es bastante grande, lo que indica que las sustancias nutritivas entran en la composición de la dieta normal; su nivel sanguíneo normal y cantidad diaria ingerida no son nulas, como suele acontecer con el medicamento que se da a un paciente por vez primera. De aquí que la manera más conveniente de administralas quizá sea como constituyente de "alimento especial para uso médico", preparado para tal propósito. Esa fraseología no implica que las enfermedades y estados en los que su uso es terapéutico tengan un origen alimentario. La disquinesia tardía no la causa ninguna carencia lecitínica, ni las alteraciones de la presión obedecen a una falta de tirosina. En estos casos las sustancias nutritivas se administrarían por su efecto farmacológico, igual que se tomarían el café, brandy, salvado o jugo de ciruela si fueran medicamentos.

En un sentido más amplio, sí resulta correcto quizá referirse a la nutrición. Las personas ancianas cuyos cerebros hayan perdido muchas de las neuronas que liberan transmisores dependientes de precursores ¿podrán acaso beneficiarse de una dieta habitual enriquecida con tirosina, triptófano o lecitina?



La zona sísmica del Mississippi

Tres de los terremotos más violentos que registra la historia de los Estados Unidos no ocurrieron en la costa oeste, como cabría presumir, sino en Nuevo Madrid, Missouri, zona castigada hoy, día sí día no, por temblores de tierra

Arch C. Johnston

Cuando se habla de terremotos, la mayoría de los norteamericanos piensa de inmediato en la violencia del que sacudió la ciudad de San Francisco en 1906 y en la amenaza continua que, para California, representa la falla de San Andrés. La verdad es que tres de los terremotos más intensos que registra la historia estadounidense se produjeron, hace 170 años, junto a un tranquilo meandro del río Mississippi, que separa el estado de Kentucky y el de Missouri, y no en la costa del Pacífico. El 16 de diciembre de 1811, el 23 de enero de 1812 y el 7 de febrero de ese último año, la región por donde discurre el río se vio sacudida por terremotos cuya magnitud se ha estimado en 8,6, 8,4 y 8,7, respectivamente. Los temblores se sintieron en toda la parte nororiental de los Estados Unidos y zonas del Canadá. Se agrietaron los edificios de Richmond (estado de Virginia) y se abrieron los pavimentos en el Distrito de Columbia, donde las campanas llegaron a sonar. Todavía hoy, esa zona, próxima a Nuevo Madrid (ciudad del estado de Missouri), continúa en actividad sísmica; se trata, empero, de terremotos de pequeña intensidad que se repiten con una frecuencia media de uno cada 48 horas. ¿A qué se debe que una zona en pleno continente sea tan pródiga en terremotos? Varios decenios de investigación facultan ya para afirmar, a modo de sorprendente conclusión, que en esta zona, en la terminación septentrional de lo que los geólogos conocen por depresión del Mississippi, hay una hendidura o grieta (*rift*) del cratón continental: porción de la gran placa norteamericana formada por las rocas más antiguas y resistentes de la corteza continental. Esa antigua hendidura o agrietamiento (*rift*) la han reactivado las fuerzas tectónicas.

La depresión del Mississippi constituye una extensa región en forma de *U* atravesada por el río que le da nombre. Arranca junto a la confluencia de los ríos Ohio y Mississippi, ensanchándose hacia el sur para formar la llanura costera del Golfo de México. Al este del Mississippi quedan unas colinas de suave ondulación recubiertas por depósitos de loess (limos transportados por el viento), señal de que el río no discurrió nunca por allí. La parte occidental de la cuenca se caracteriza por ser llana en toda su extensión. Sus terrazas de arena y grava, los escarpes producidos en las épocas de inundación, las divisorias del drenaje y las curvas que forman los meandros abandonados permiten deducir que el río divagó en el pasado por una zona alejada de su curso actual.

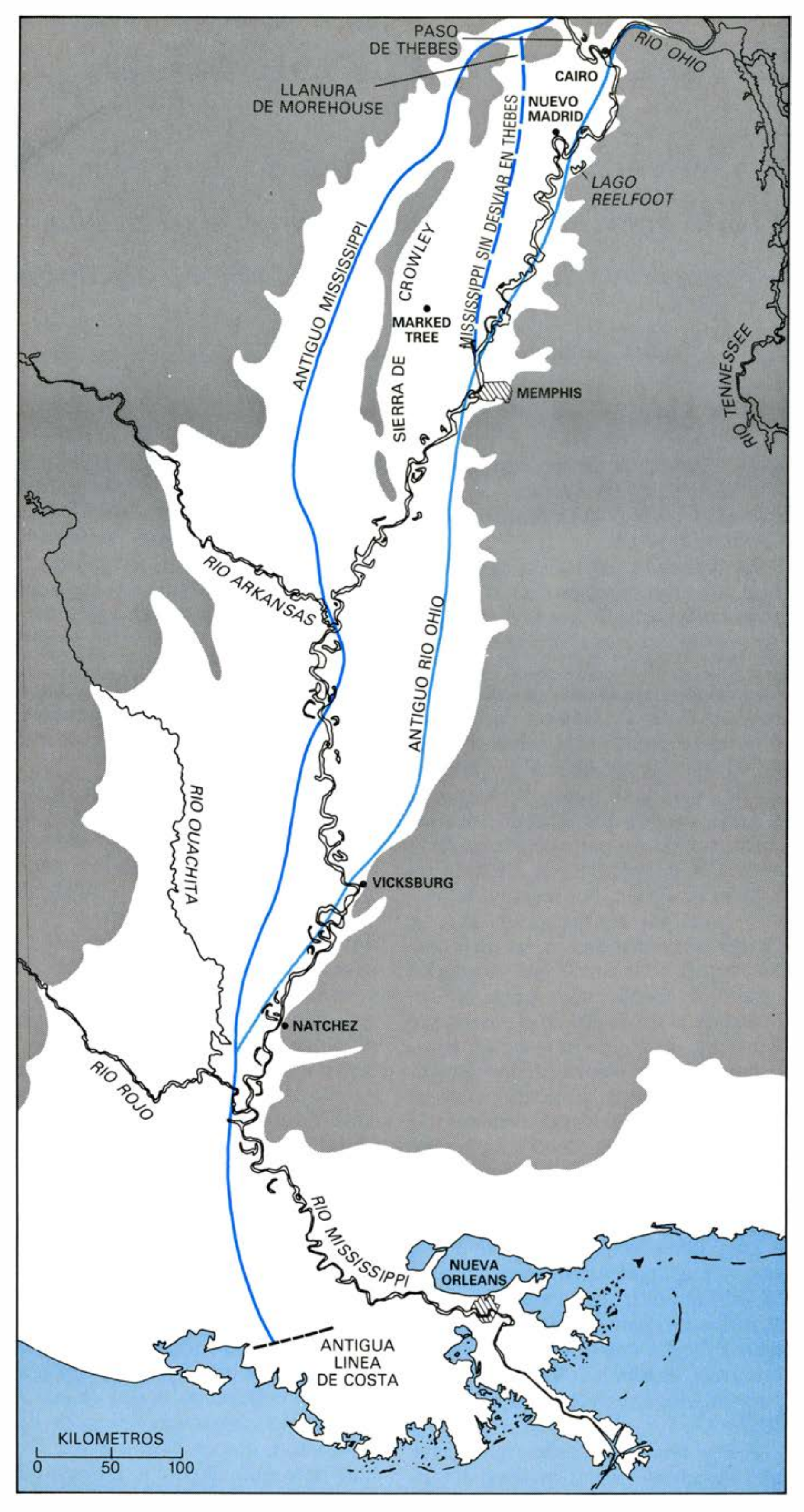
La ciudad de Nuevo Madrid está situada en el margen septentrional de un meandro del Mississippi denominado Kentucky Bend. Se fundó a finales del siglo XVIII, cuando la región era territorio español, al objeto de establecer allí un centro comercial destinado a las barcazas y gabarras que navegaban por el río. A principios del siglo XIX, Nuevo Madrid era el mayor asentamiento de la región en cuanto a número de habitantes. De ahí que se utilizara su nombre para denominar los sucesos extraordinarios que ocurrieron en 1811 y 1812.

A los tres importantes terremotos que ocurrieron aquel invierno les siguieron una serie de fuertes y prolongadas réplicas sísmicas. Fue un espectáculo impresionante. De la profundidad del suelo, saturado, brotaban enormes geiseres de arena y agua. Durante las sacudidas principales, el terreno se onduló, subiendo y bajando minutos enteros; los árboles quedaron convertidos en astillas; se oyó un bramido largo y sordo. El aire olía a azufre. Afirma un testigo de los hechos que las réplicas produjeron unas continuas vibraciones "como la carne de vaca recién sacrificada".

La tercera sacudida principal, la más violenta, alteró con mayor aparatosidad el tranquilo Mississippi. Así relata los hechos alguien que asistió a ellos: "serían las cuatro de la madrugada cuando se produjo una conmoción tanto o más violenta que las que la habían precedido, por lo que la gente la llamó 'la sacudida fuerte'... Al principio parecía que el Mississippi retrocedía de sus orillas... uniéndose sus aguas para formar una montaña, que se deshizo en seguida para caer con tal violencia que arrastró consigo las plantaciones de algodón que bordeaban sus riberas... El río quedó prácticamente cubierto por restos de embarcaciones". Cambió hasta el propio lecho del río: se formaron dos cascadas (o, como mínimo, rápidos), una aguas arriba de Nuevo Madrid y la otra curso abajo.

La historia geológica reciente de la depresión del Mississippi está íntimamente relacionada con la última de las grandes invasiones glaciales del Pleistoceno, que en Norteamérica terminó hace unos 8000 años. En su máximo avance, la glaciación de Wisconsin, recubrió casi toda la zona septentrional de los Estados Unidos centrales, extendiéndose, por el sur, hasta la parte meridional del estado de Illinois. Había tanta agua almacenada en los inmensos casquetes de hielo formados durante el período de Wisconsin que el nivel del mar se encontraba entre 60 y 80 metros

FOTOGRAFIA AEREA DE LOS ALREDEDORES DE NUEVO MADRID, obtenida por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) para un estudio auspiciado por el Arma de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. El meandro que forma el Mississippi en la parte superior izquierda de esta foto tomada en falso color se conoce por Kentucky Bend. Se divisa parte de la ciudad de Nuevo Madrid en la orilla septentrional del río. Estamos en otoño; se ha cosechado ya en varios campos que aparecen en retículos rectangulares de las zonas bajas (la vegetación se representa aquí en rojo). En la punta inferior derecha asoma la porción nordeste del lago Reelfoot, en el estado de Tennessee. El mapa de la página 36 incluye la zona recogida aquí (que cubre parcialmente la región sísmica levantada del lago County).



ASI DISCURREN HOY los ríos Mississippi y Ohio, que se juntan en las proximidades de Cairo, en el estado de Illinois. Cursos muy distintos seguían en el Pleistoceno superior. El Ohio de entonces (*en color claro*) no se unía al viejo curso del Mississippi hasta la vecindad de Natchez. El segundo (*en color intenso*) discurría en esa época mucho más hacia el oeste, a lo largo de casi todo el cauce. El desvío posterior de Morehouse (*línea de color a trazos*) situó la zona de confluencia de ambos ríos en las inmediaciones de Memphis. Actualmente ese punto de unión se halla aguas abajo del Paso de Thebes. Las regiones coloreadas en gris, a este y oeste, vienen a coincidir con la curva de nivel de 76 metros. La zona deprimida, entre el río Tennessee y la curva de nivel occidental, recibe el nombre de depresión del Mississippi, que se ensancha para formar la llanura costera del Golfo. El ensanchamiento y erosión del valle causados por los antiguos ríos, en sus vertientes orientales y occidentales, produjo la alineación de crestas de Crowley.

más bajo que en la actualidad; la mayor parte de las plataformas continentales eran tierra firme. Los hielos bloquearon los cauces septentrionales de los ríos Ohio y Missouri, que antaño corrían hacia el norte para desembocar en la bahía de Hudson y en el río San Lorenzo; obligados así a desviarse hacia el sur, pasaron a engrosar el sistema de drenaje de la cuenca del Mississippi.

Al descender el nivel del Golfo de México, el gradiente de los ríos que discurrían hacia el sur era más pronunciado. Este hecho, sumado a otras causas (como las inundaciones), hizo que el Mississippi y el Ohio, que vertía entonces sus aguas en el Mississippi cerca del lugar donde hoy se sitúa la ciudad de Natchez, se encajaran profundamente en la depresión del Mississippi. Cuando este río alcanzaba la plataforma continental, su cauce se encontraba a una cota 100 metros por debajo de la que tiene hoy. La fusión de los glaciares elevó el nivel del mar y movilizó enormes cantidades de materiales de origen glaciar, de modo que los valles fluviales, profundamente encajados, se rellenaron muy pronto con sedimentos aluviales.

En la década de 1940, Harold N. Fisk, ingeniero militar de los Estados Unidos, puso de manifiesto un dato de particular interés relativo al sistema fluvial Mississippi-Ohio durante el Pleistoceno superior, que se remonta unos 18.000 años. Fisk demostró que el valle del Mississippi se encontraba, en aquella época, mucho más hacia el oeste de su curso actual y que el valle del río Ohio atravesaba lo que hoy constituye la parte oriental del estado de Arkansas y la occidental del de Mississippi. Tras el retroceso de la glaciación de Wisconsin, el curso del Mississippi se desvió hacia el este, desde las llanuras occidentales de la depresión del Mississippi hasta atravesar finalmente un paso estrecho, en el vértice de la depresión, que hoy recibe el nombre de Paso de Thebes.

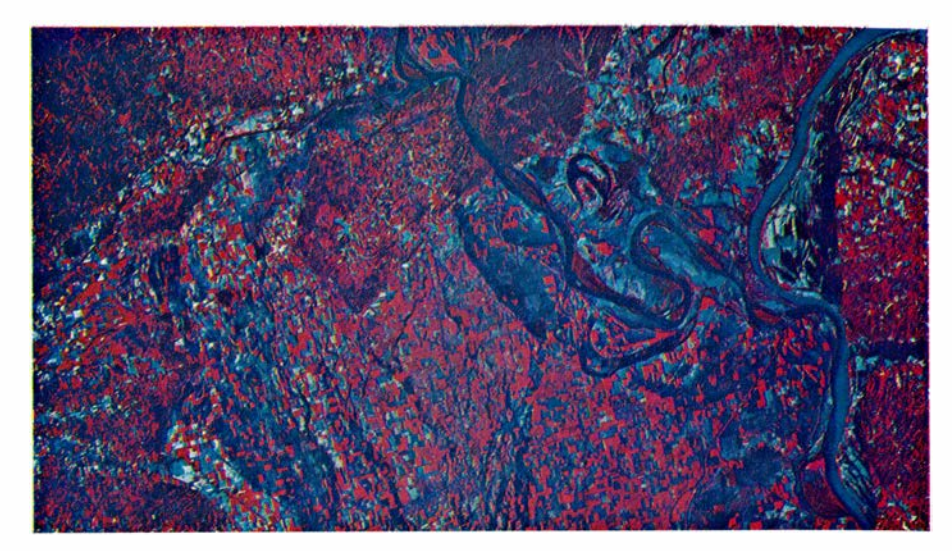
¿Qué es lo que originó un cambio tan brusco del curso fluvial? Fisk consideró dos posibilidades: un encajamiento gradual en el Paso de Thebes (por erosión periódica producida durante las inundaciones) y una erosión remontante de un afluente del Ohio que, finalmente, produjo la "captura" del Mississippi. Hay una tercera posibilidad: el desvío a través del Paso de Thebes sería de origen tectónico, en particular, por fenómenos de fracturación.

Parece bastante asentado que el control del curso del Mississippi sea de origen tectónico en determinados puntos.

Un ejemplo de ello lo tenemos en Lake County (Tennessee), en el corazón de la zona sísmica de Nuevo Madrid. En 1974, la Universidad de San Luis, en colaboración con el Servicio Geológico de los Estados Unidos, instaló una red de instrumentos sísmicos modernos en la zona de Nuevo Madrid, que se completó, en 1979, con la instalación de una segunda red por la Universidad estatal de Memphis y la Comisión de Reglamentación Nuclear. De esta segunda red se responsabiliza el Centro de Información Sísmica de Tennessee, adscrito a la universidad. La zona de Nuevo Madrid está baja vigilancia las 24 horas del día, pudiendo estas redes localizar y detectar movimientos de sólo 1,0 grados de magnitud (que representan una liberación de energía equivalente al impacto de un peso de dos toneladas lanzado desde unos cuatro metros).

Unos 700 kilómetros cuadrados de la región de Lake County han sufrido levantamiento; la parte central de la zona se eleva entre tres y 10 metros sobre sus alrededores. Lo que podría parecer, en principio, insignificante. Pero no es fácil explicar la existencia de tal prominencia en medio de una llanura de inundación situada al mismo nivel del río. Los datos obtenidos de la red sísmica demuestran que la zona levantada se encuentra sobre la parte de la zona sísmica de Nuevo Madrid donde es más intensa la actividad. La mayoría de los movimientos registrados son microsismos de magnitud inferior a 2,5 grados (aproximadamente en el umbral de la percepción humana). David P. Russ, del Servicio Geológico, que ha estudiado el levantamiento de Lake County, señala que esta zona elevada es la responsable del desvío del curso del Mississippi hacia el oeste entre Hickman (Kentucky) y Caruthersville (Missouri). Denuncia la existencia, en esta zona, de una geometría y gradientes fluviales anómalos y considera el levantamiento como una respuesta superficial al movimiento localizado en fallas profundas. La coincidencia geográfica de esta zona con la de intensa actividad microsísmica sugiere que la mayor parte del movimiento desarrollado sobre la falla es sísmico, es decir, producido por un desplazamiento brusco que origina ondas sísmicas, y no causado por una liberación gradual de deformación cortical acumulada.

Si el desvío del curso del río en Hickman débese a episodios tectónicos recientes, ¿no podría acaso resultar el desvío del Paso de Thebes de procesos del mismo tipo, pero más antiguos? El paso se halla a unos 30 kilómetros al norte de Nuevo Madrid. Aunque no podemos asociar hoy la zona a ninguna concentración relevante de microsismos, se han cartografiado en ella muchas fallas. A falta de estudios más concluyentes sobre el particular, esta hipótesis es verosímil, si bien carece de suficiente apoyatura observacional.



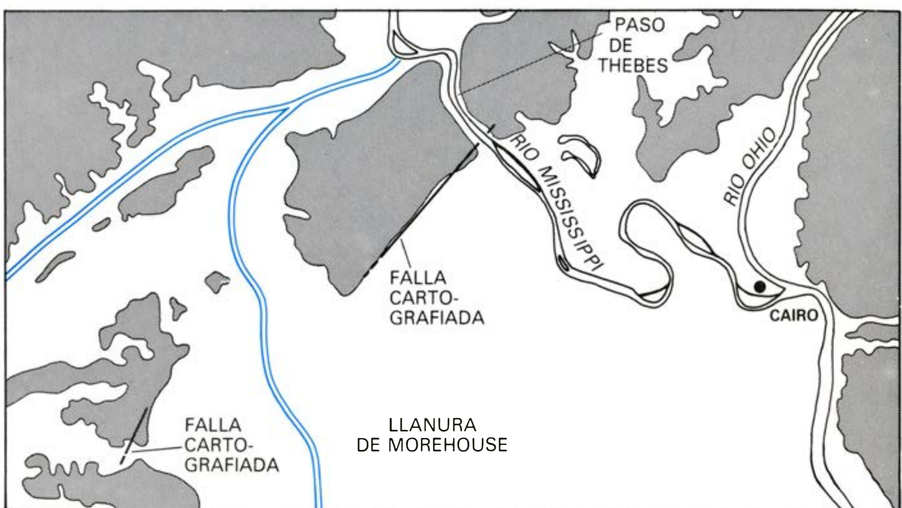
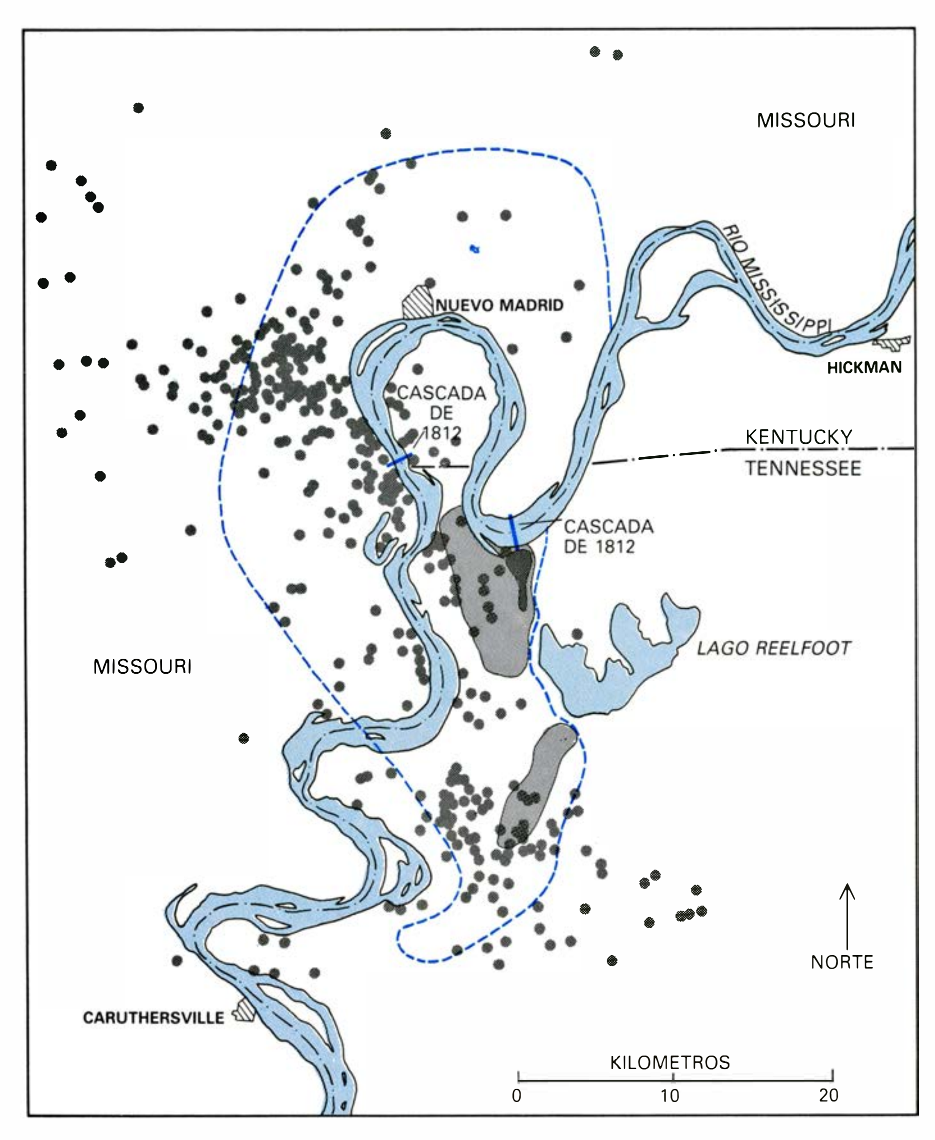


IMAGEN LANDSAT de la zona próxima a la confluencia del Mississippi con el Ohio (*arriba*), donde se observa cuán angosto es el Paso de Thebes. El mapa de esa misma zona (*abajo*) permite localizar las fallas existentes sobre dos bloques levantados, cartografiadas por el Servicio Geológico de Missouri; se ilustran también dos antiguos cursos del Mississippi (*líneas de color*). El desvío del cauce hacia el Paso de Thebes pudo deberse a la erosión que produjeron las sucesivas inundaciones o a la captura del curso, si bien la presencia de una falla aboga por un origen tectónico del suceso. En blanco aparecen las zonas deprimidas.

Explicar la actividad sísmica en la región de Nuevo Madrid cuesta bastante más que justificar ese mismo fenómeno en la falla de San Andrés. La falla de California presenta una cicatriz que destaca en superficie y tiene desplazamientos mensurables; su traza principal y las secundarias están perfectamente cartografiadas. Ocurre todo lo contrario en la zona de Nuevo Madrid: las fallas quedan profundamente enterradas bajo los sedimentos del río, que a su vez se encuentran sobre una serie sedimentaria marina aún más potente, depositada sobre el fondo de un antiguo mar. En ningún punto de la actual depresión del Mississippi hallamos trazas de superficies de falla permanentes, como puedan ser las cascadas y rápidos producidos por las fuertes sacudidas del mes de febrero de 1812; si alguna existió, hace ya tiempo que la erosión y la movilización de sedimentos la borraron.

La principal dificultad estriba en explicar por qué tiembla la depresión del Mississippi. Después de todo, la falla de San Andrés constituye un accidente de borde de placa, y como tal se la ha considerado desde la formulación de la teoría de la tectónica de placas, a principios de la década de 1960. Una placa es un fragmento rígido y resistente de la litosfera (la capa de rocas más externa de la tierra, que comprende la corteza y el manto superior). Se comporta como una unidad individualizada, que avanza lenta merced a la concurrencia de una serie de fuerzas, generadas, en última



TERRENOS ALUVIALES de la zona sísmica de Nuevo Madrid. Comprenden un elemento topográfico de escaso resalte conocido por levantamiento del lago County. La línea discontinua (*en color*) delimita la región levantada, cartografiada por David P. Russ, del Servicio Geológico de los Estados Unidos. En las zonas grises, encima y debajo del lago Reelfoot, la elevación es superior y, en la más oscura, junto al trazo que atraviesa el río (*en color*), el levantamiento es máximo. Llegó a situarse hasta 10 metros por encima de las tierras circundantes. El trazo en color, junto con otro situado aguas abajo, hacia el oeste, indican el lugar donde se formaron dos saltos de agua a raíz de las fracturas originadas en el lecho del río por el terremoto de febrero de 1812. El lago Reelfoot también aumentó de tamaño por los sismos de 1811-12. Quizá resida en ese levantamiento la causa del desvío del Mississippi hacia el oeste en las cercanías de Hickman (Kentucky). Los círculos señalan algunos de los terremotos registrados en la zona desde 1974.

instancia, por la lenta liberación convectiva del calor interno de la tierra.

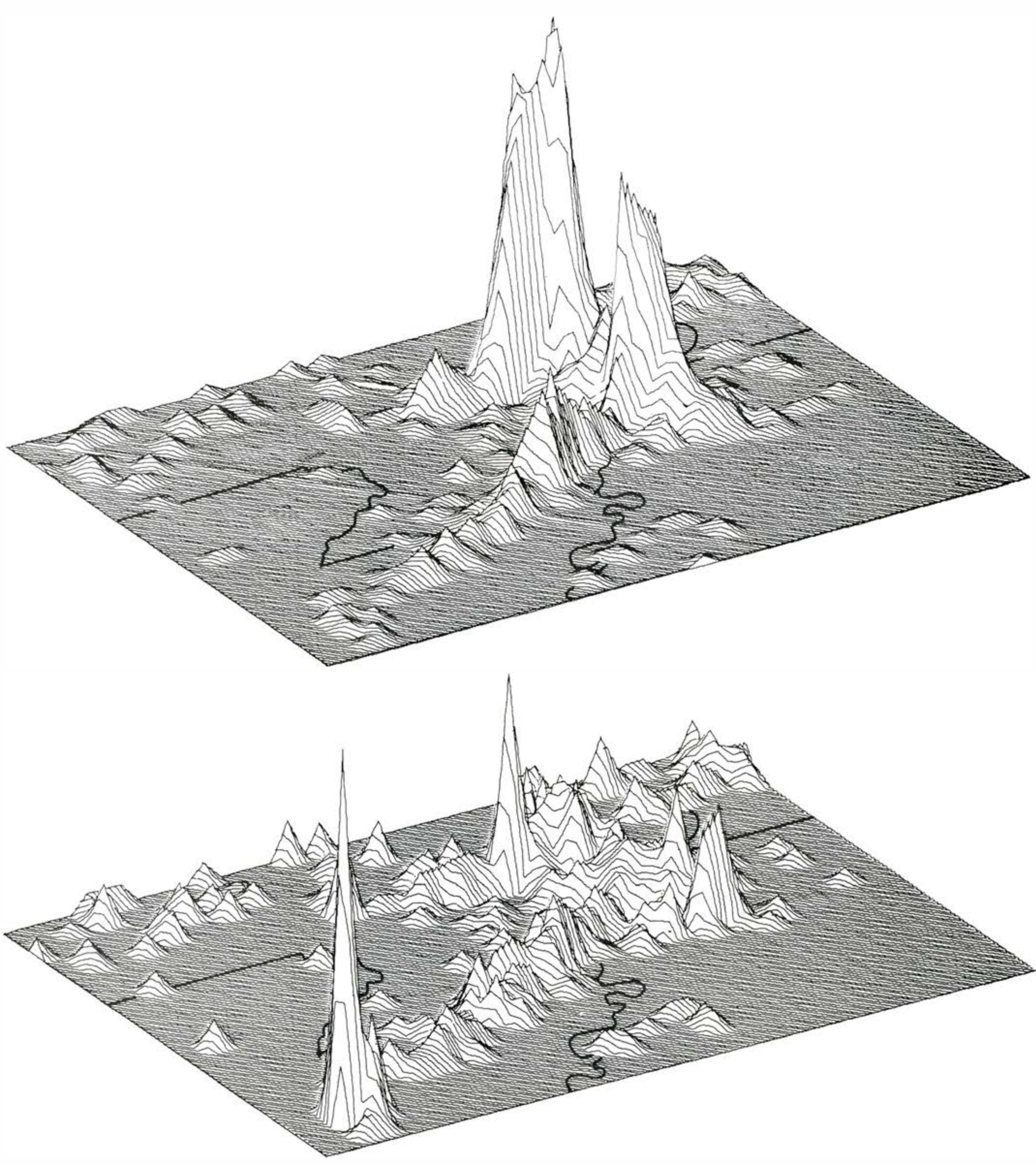
En California, este movimiento presenta unos valores medios de unos 5,5 centímetros por año, que producen un desplazamiento hacia el noroeste de la placa del Pacífico a lo largo del sistema de fallas de San Andrés, sistema que define los límites entre la placa del Pacífico y la placa Norteamericana. Allí donde se pone trabas al avance, como está ocurriendo ahora en el norte y sur de California, la falla queda bloqueada; almacena así energía de deformación, que acabará, inevitablemente, por liberarse. Puesto que el desplazamiento medio en un terremoto importante varía entre seis y ocho metros, el tiempo de recurrencia de un gran movimiento sísmico a lo largo de la falla de San Andrés se cifrará entorno a los 110 o 145 años, a menos que una serie de sacudidas menores y más frecuentes liberen la energía actualmente almacenada en la falla.

Pero la zona sísmica de Nuevo Madrid no constituye ningún borde de placa. No cabe, pues, el lógico cálculo del tiempo de recurrencia antes apuntado. La verdad es que los terremotos de la zona de Nuevo Madrid pertenecen a un tipo de fenómenos poco frecuentes, denominados terremotos de intraplaca, de poca significación a escala mundial. La teoría de la tectónica de placas no aporta todavía una explicación satisfactoria para los movimientos sísmicos de intraplaca. Y el caso es que los terremotos de 1811 y 1812 de Nuevo Madrid constituyen ejemplos relevantes de estos acontecimientos, en general poco frecuentes.

Los datos de las redes de sismógrafos de la depresión del Mississippi ofrecen un cuadro informativo de la continuidad de la actividad en la zona de Nuevo Madrid. Los sismómetros han permitido localizar con precisión los epicentros e hipocentros de los terremotos. (El epicentro es la proyección en superficie del hipocentro, que constituye el foco profundo de un movimiento sísmico.) La determinación precisa del tiempo resulta crucial para localizar esos puntos, pues un error de 0,1 a 0,2 segundos en el registro del tiempo de llegada de una onda sísmica puede hacer variar el cálculo de la localización de un hipocentro en varios kilómetros. Debido a la sensibilidad cada vez mayor de los nuevos instrumentos, lo que antes parecía una perfecta dispersión aleatoria de epicentros se nos muestra ahora como una agrupación mucho más apretada, que presenta diversos caracteres lineales bien definidos. Los epicentros de terremotos de magnitud 1, o mayor, se recogen en el mapa con una imprecisión de un kilómetro, si llega, en longitud y latitud. Por contra, la inexactitud relativa a la profundidad de los hipocentros es del orden de varios kilómetros.

Quizá convenga detenernos brevemente sobre las escalas de magnitud. La primera de ellas fue ideada en 1935 por Charles F. Richter, del Instituto de Tecnología de California. Puesto que la magnitud de los terremotos presenta variaciones muy grandes, le pareció lo más adecuado utilizar una escala logarítmica. En ella, la magnitud es proporcional al logaritmo (en base 10) de la amplitud de la onda sísmica registrada. El aumento de una unidad en la escala representa un aumento de la amplitud de la onda según un factor de 10, lo que, a su vez, significa un incremento en la energía sísmica liberada según un factor de aproximadamente 32. Los grandes terremotos, magnitud 8, o superior, liberan una energía muchos millones de veces mayor que la de un seísmo de magnitud 1. Así pues, la sacudida fuerte (de magnitud 8,7) de Nuevo Madrid liberó más energía, a través de sus ondas sísmicas (es decir, sin incluir la energía mecánica o calorífica producida), que la que podría liberar la explosión de 150 millones de toneladas de trilita (TNT).

La mayoría de los terremotos que se producen hoy en la zona de Nuevo Madrid son microsismos. En el período comprendido entre mediados de 1974, cuando se instaló la actual red de sismógrafos, y mediados de 1981, se ha venido registrando una media anual de más de 150 sismos de magnitud superior a 1. De todos ellos, que suman más de 1000, los habitantes de la región han advertido en torno a los 50, lo que equivale a unos siete por año, es decir, menos del 5 por ciento del total. Desde que se produjeron los grandes temblores de 1811-12 sólo se tiene constancia de dos sacudidas de magnitud igual a 6 o superior: la primera se produjo en 1843 y, la segunda, en 1895. En esta región no se disponía de sismógrafos hasta que se instalaron los de San Luis, en 1909. De entonces acá, sólo se han registrado terremotos leves. El más reciente, de magnitud 5, se produjo cerca de Marked Tree (Arkansas) el 25 de



REPRESENTACION GRAFICA, obtenida por ordenador, de la actividad sísmica en la región de Nuevo Madrid. En la representación superior, la altura de un pico es proporcional al número de terremotos registrados desde julio de 1974. El pico más alto representa 19 terremotos, comprendidos en un área de dos kilómetros cuadrados. Tanto éste como el otro pico elevado próximo se encuentran sobre intersecciones de fallas. En la inferior, la altura de los picos indica la energía sísmica acumulativa liberada. La escala vertical es exponencial; si fuera lineal, el pico más alto multiplicaría un millón de veces la altura de los inferiores. El pico del extremo inferior izquierdo representa un terremoto de magnitud 5,0, ocurrido en 1974, y su réplica, de magnitud 4,5.

marzo de 1976 y lo sintieron en siete estados.

¿Fue la serie de intensos terremotos de 1811-12 un acontecimiento aislado? Los recientes trabajos de Russ sugieren que no. Al excavarse una zanja en el sector levantado de Lake County se pusieron al descubierto dos zonas de sedimentos deformados y fallados. Russ atribuye el estado en que se encuentra los sedimentos a los efectos de grandes terremotos. Las conchas fragmentarias desenterradas con los sedimentos afectados han proporcionado edades de 2000 ± 250 años, determinadas mediante datación con carbono-14. Por tanto, esos acontecimientos, que precedieron con mucho a los de 1811-12, sugieren un tiempo de repetición de grandes terremotos del orden de 600 a 800 años.

La disposición de los epicentros microsísmicos parece poner de manifiesto la orientación de tres fallas profundas en la región de Nuevo Madrid. Se distinguen nítidas dos direcciones principales. Una falla, posiblemente discontinua, se dirige al sureste, desde Nuevo Madrid hasta la región de Lake County, al noroeste del estado de Tennessee. La otra, de mayor longitud, se extiende a lo largo de 100 kilómetros; lleva dirección sudoeste, desde el "tacón de bota" del Missouri hasta la parte nororiental de Arkansas, donde termina abruptamente en la ciudad de Marked Tree, 60 kilómetros al noroeste de Memphis. Una tercera falla, menos desarrollada, se dirige hacia el noroeste, desde la primera fractura hasta las cercanías de la ciudad de Cairo (Illinois). En esos tres segmentos, las mediciones de la profundidad de sus hipocentros microsísmicos correspondientes arrojan valores comprendidos entre los 5 y 20 kilómetros, lo que sitúa las fallas en pleno zócalo granítico de la parte superior y media de la corteza continental.

Difieren las dos fallas principales por la liberación de su energía de deformación y por el tipo de fracturación. La primera de ellas, a la que denominaremos segmento transversal a la depresión, produce cuatro veces más microsismos que la segunda, o segmento axial, y libera sólo una cuarta parte de la energía sísmica. El segmento axial origina menos sismos, pero las sacudidas de magnitud mayor tienden a concentrarse a lo largo de ella. Este contraste podría deberse a diferencias en los valores de los esfuerzos: las rocas del segmento axial pueden ser más resistentes y estar menos fracturadas que las del segmento transversal a la depresión y almacenar, por tanto, más energía de deformación entre los períodos de liberación energética.

Podemos distinguir también las fallas en razón del desplazamiento de uno de sus bloques limitantes con respecto al otro. Las fallas con buzamiento fuerte, que presenten sólo movimiento horizontal, se denominan de rumbo. Si el otro labio se mueve hacia la derecha, se dice que la falla tiene un desplazamiento lateral derecho y, si se mueve hacia la izquierda, un desplazamiento lateral izquierdo. Otro caso es aquel en que el bloque superior de un plano de falla inclinado se mueve hacia arriba: se trata entonces de una falla inversa. Si este bloque se mueve hacia abajo, se habla de una falla normal. Estas distinciones encierran un significado que trasciende la simple clasificación de los accidentes. Los diferentes tipos de fallas exigen distinta orientación del campo de esfuerzos predominante. Las fallas de rumbo y las inversas requieren un esfuerzo de compresión máximo horizontal, mientras que las normales necesitan un esfuerzo de compresión máximo vertical y un esfuerzo de compresión mínimo horizontal, e incluso esfuerzos de tensión.

Tras estudiar las características de las ondas sísmicas producidas por los terremotos de Nuevo Madrid, Robert B. Herrmann, de la Universidad de San Luis, ha determinado qué tipos de fracturación dominan en los principales segmentos de las fallas: en el segmento axial (y posiblemente en el segmento de la ciudad de Cairo) predominan los movimientos de componente lateral derecha. Los resultados relativos al segmento transversal a la depresión son menos claros, si bien parece haber indicios de fallas inversas. La presencia de fallas de estos tipos es compatible con el levantamiento observado en Lake County y con un solo campo de esfuerzos regional, donde el esfuerzo de com-

CRATON NORTEAMERICANO, limitado por la línea gruesa de color. Está formado por las rocas más antiguas, rígidas y resistentes del continente. La mayor parte de la actividad sísmica queda circunscrita a su periferia (*zonas coloreadas*). No figura en el mapa la actividad sísmica a lo largo del contacto entre la placa del Pacífico y la placa Norteamericana. Las flechas negras indican los campos de esfuerzo horizontal predominantes que inciden en la corteza: compresivos al este y en la parte interior del continente y distensivos al oeste. En el cratón, se diferencia mediante líneas negras a trazos el afloramiento del zócalo (escudo) de los pequeños espesores de rocas sedimentarias (plataforma). La zona sísmica de Nuevo Madrid no se encuentra encima mismo del cratón, sino sobre una "cuña" limitada por fallas profundas y constituida por materiales propios de la llanura costera que penetran en el cratón desde el sur. Los datos los recogieron Steven Wesnousky y Christopher Scholz, del Lamont-Doherty Geological Observatory.

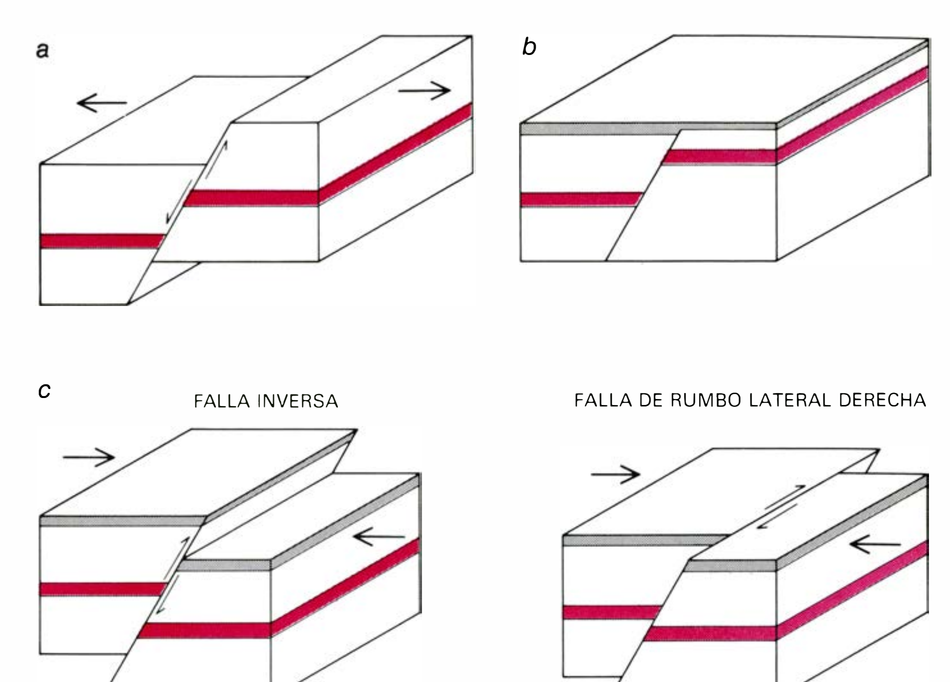
presión máximo es horizontal y de dirección este-oeste. Lo que concuerda con el gran número de mediciones del esfuerzo realizadas en Norteamérica, y recogidas por Mark y Mary Lou Zoback, del Servicio Geológico, que señalan también un campo de esfuerzos de orientación este-oeste para la compresión en la mayor parte de la zona continental central.

¿Qué podemos deducir? La hipótesis enunciada afirma que el esfuerzo de compresión se transmite hacia el interior de la placa gracias a interacciones localizadas en los bordes de la misma o, posiblemente, por interacción de la litosfera rígida con la parte más dúctil del manto subyacente inmediato. Tanto en un caso como en el otro, el origen de los esfuerzos generados por los terremotos de Nuevo Madrid reside en el movimiento de la placa que, a su vez, está desencadenado por el calor interno de la tierra.

Saber que el movimiento de la placa origina el campo de esfuerzos responsable de los terremotos de la región de Nuevo Madrid es detenerse en la mitad del problema. Hay que considerar también las propias fallas de la parte central del continente. Y preguntarse por qué esa combinación particular de fallas y esfuerzos es sísmicamente activa, cuando existen otras zonas en el interior del continente sujetas a los mismos esfuerzos regionales que presentan, sin embargo, escasa actividad, en el caso de que la hubiera. Comencemos por exponer sumariamente cuanto conocemos sobre la estructura de la corteza terrestre en la depresión del Mississippi.

Gran parte de la nueva información referente a la depresión proviene de los programas de investigación llevados a cabo por el Servicio Geológico y por el Grupo de Estudios Sismotectónicos de Nuevo Madrid, subvencionado este último por la Comisión de Reglamentación Nuclear. Las investigaciones realizadas indican que la corteza subyacente a la depresión tiene una zona de debilidad debido a la presencia de un antiguo agrietamiento (*rift*). Las fallas asociadas al agrietamiento quizás estuvieran inactivas a lo largo de millones de años, pero hoy han vuelto a ponerse en movimiento. Actividad que se atribuye al régimen de esfuerzos compresivos de dirección este-oeste a que ha sido sometida la parte central del continente. Esfuerzos y desplazamientos inducidos por aquellos que no tienen nada que ver con los esfuerzos responsables de la formación del agrietamiento inicial.

Los cratones continentales se cuentan entre las regiones más tranquilas de la tierra. Mas las rocas corticales existentes bajo la depresión del Mississippi constituyen, al parecer, una "cuña" dentro del cratón norteamericano, pues no son las que caracterizan a este último, sino que se trata de rocas propias de la llanura costera que cae más al sur. Las indentaciones de este tipo son típicas de un "brazo abortado" que se integre dentro de los sistemas de puntos triples asociados con "focos térmicos" o "penachos" del manto terrestre. Kevin C. Burke y John F. Dewey, de la Universidad estatal de Nueva York en Albany, abogan por la existencia, en esta zona de *rift*, de un foco térmico semejante bajo el cratón norteamericano hace unos 300 millones de años. Pero hay quienes opinan que el foco térmico era mucho más antiguo, del precámbrico; según estos, se habría formado hace más de 1000 millones de años. Un foco térmico no es el único mecanismo que podría haber producido un agrietamiento de este tipo en la corteza, pero resulta muy eficaz como hipótesis de trabajo.



REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UNA REMOVILIZACION DE FALLAS. Se forma una falla normal (*a*) cuando la componente horizontal del campo regional del esfuerzo (*flechas*) es de distensión, hundiéndose un bloque con respecto al otro. La erosión y sedimentación (*b*) fosilizan el afloramiento en superficie de la falla. La falla puede removilizarse si actúa un esfuerzo de compresión (*c*). Si el bloque superior sube, la falla removilizada es de tipo inverso (*a la izquierda*). Si un bloque se mueve horizontalmente con respecto al otro, la falla es de rumbo (el movimiento hacia la derecha es lateral derecho y, hacia la izquierda, lateral izquierdo). Cabe también la aparición de fallas oblicuas en el caso de que se combinen los dos tipos anteriores. Las fallas normales de la zona sísmica fracturada de Nuevo Madrid presentan una removilización producida por componentes de falla inversa y de rumbo. Dibujo de Andrew Tomko.

La denominación de "brazo abortado" indica que esta porción de *rift* no se desarrolló posteriormente, formando un borde de placa activo y divergente. (Los otros dos brazos pueden o no haberse desarrollado en un borde de este tipo.) De cualquier modo, el brazo abortado presentaría la mayoría de caracteres, si no todos, de una zona de agrietamiento o *rift* continental activa: abertura y fracturación de la corteza, intrusiones de magma denso procedente del manto, anomalías gravimétricas positivas y formación inicial de un domo, seguido de subsidencia cuando, en la parte inferior de la corteza, la intrusión de magma procedente del manto se enfría y contrae. Los ríos ocupan con frecuencia este tipo de zonas hundidas; por lo que sobre esa parte más delgada y fallada de la corteza se acumulan potentes capas de sedimentos.

¿En qué grado se ajusta la depresión del Mississippi a este modelo de *rift* con un brazo abortado? Investigaciones geofísicas, que se habían propuesto determinar estructuras geológicas profundas y localizadas mucho más allá de donde pueden alcanzar los sondeos más penetrantes, apoyan esta interpretación. Las mediciones gravimétricas han detectado plutones (intrusiones de rocas densas del manto que hacen aumentar localmente el campo gravitatorio) en las rocas corticales de la depresión. Del estudio de las discontinuidades estructurales profundas mediante la reflexión de ondas sísmicas se desprende la

existencia de una corteza delgada dentro de la depresión, bajo la cual habría una acumulación anómala de rocas del manto.

La hipótesis del agrietamiento o *rift* recabó apoyo también de los trabajos realizados en 1977-78 por Tom Hildenbrand y colaboradores, del Servicio Geológico, quienes llevaron a cabo un extenso análisis aereomagnético de la región. Al igual que la gravedad, el campo magnético de la tierra depende de las características de las rocas profundas. Por ejemplo, el elevado contenido en hierro de las rocas ígneas, así las que forman el magma del manto, hace que se obtengan valores anormalmente altos del campo magnético, mientras que el bajo contenido en hierro de las rocas sedimentarias es responsable de valores más bajos.

En la campaña realizada por Hildenbrand se utilizó una técnica de contrastación de datos que no sólo puso de manifiesto las intrusiones ígneas, sino que localizó también los límites de cuerpos intrusivos muy pequeños. Un mapa de "isolíneas" que incorpora estos datos reforzados revela la existencia de una zona de magnetismo reducido que atraviesa la región de Nuevo Madrid en dirección nordeste-sudoeste y separa las zonas adyacentes que tienen numerosas intrusiones ígneas y poseen, por tanto, mayor intensidad magnética. La zona de baja intensidad, de unos 75 kilómetros de anchura, se extiende desde el sur de Memphis, hacia el norte, hasta rozar, casi, el vértice de la depresión del Mississippi. Hildenbrand atribuye la baja intensidad magnética de la zona a una subsidencia de dos kilómetros del zócalo, debida al enfriamiento del brazo abortado y la consiguiente sobrecarga de sedimentos. La dirección axial de los fenómenos sísmicos de Nuevo Madrid es paralela al antiguo agrietamiento, centrándose entre sus bordes limitantes.

Los datos de intensidad magnética obtenidos por el Servicio Geológico han convencido a muchos geólogos, entre los que me incluyo, de que, bajo la depresión del Mississippi subyace un *rift* profundo. Los hallazgos de Hildenbrand han creado una situación similar a la que comportaba la aceptación de la expansión del fondo oceánico cuando, en 1966, las mediciones realizadas en el mismo revelaron la casi perfecta simetría de un determinado perfil de la intensidad magnética a cada lado de la dorsal del Pacífico oriental. Las nuevas ideas necesitan, a menudo, la ayuda de alguna demostración especialmente concluyente para convencer a los escépticos.

Cuando se produjo el agrietamiento, el cratón norteamericano se hallaba sometido a esfuerzos de tensión horizontales. En el régimen de compresión este-oeste al que está sujeto hoy, las fallas normales asociadas al inicio de la fracturación se han reactivado como fallas inversas y de rumbo. Robert M. Hamilton y Mark Zoback, del Servicio Geológico, acaban de aplicar una nueva técnica de análisis sísmico al objeto de identificar, por primera vez, la zona de falla, afectada por una gran deformación, que origina los terremotos de dirección axial en la región de Nuevo Madrid. Otros dos geólogos del Servicio, Ernest Glick y Anthony J. Crone, han demostrado que una falla del lado sudeste de la zona de agrietamiento ha sufrido un levantamiento de 80 metros desde que se produjo la subsidencia hallada por Hildenbrand.

PREDICCION DE TERREMOTOS de una zona sísmica. Cuando se representa gráficamente, a escala logarítmica, el número acumulado de sismos por año en función de las magnitudes de los mismos, se obtiene una línea casi recta. En esta gráfica se aplica el método a los datos de Nuevo Madrid. La gráfica tiene una escala de magnitud doble: las magnitudes de la onda de superficie (*en color*) para los fenómenos importantes y magnitudes de las ondas *S* y *P* para los sismos menores. La representación indica que es probable que un sismo de magnitud superior a 8, como los de 1811-12, ocurra sólo cada 600-1800 años.

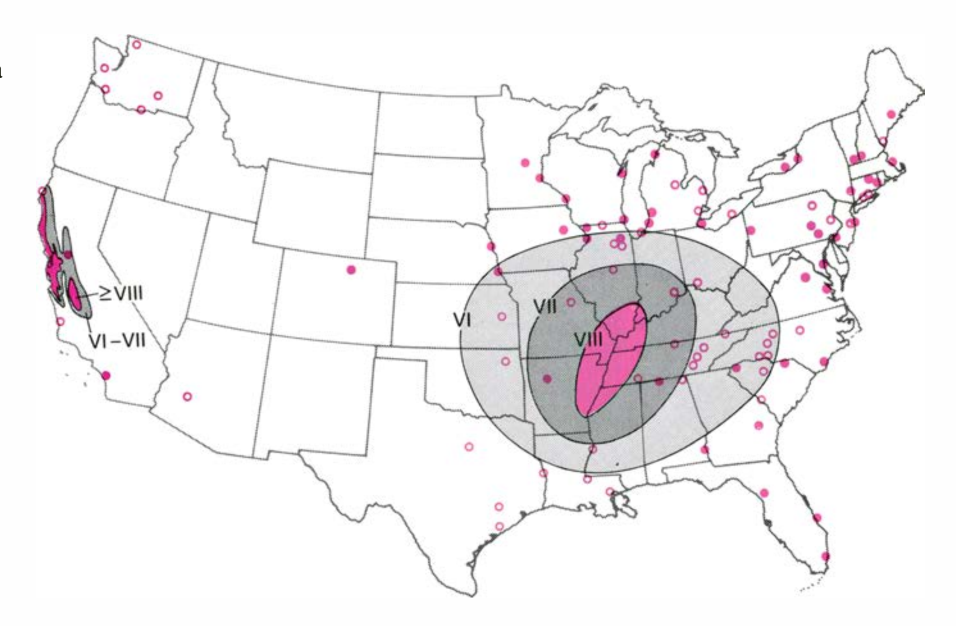
Si pudiera predecirse el ritmo de recurrencia de los terremotos mayores de la región de Nuevo Madrid se estimaría su vulnerabilidad sísmica con bastante precisión. En la región donde se encuentra la falla de San Andrés se miden directamente los desplazamientos producidos en las fallas, pero no siendo ello posible en la depresión del Mississippi, hay que recurrir a otros métodos. El elegido deriva de una observación empírica, según la cual, para toda región sísmica existe una relación lineal entre la magnitud de un terremoto y el logaritmo del número acumulado de terremotos iguales o menores que dicha magnitud.

Se trata, lisa y llanamente, de expresar de forma cuantitativa un hecho comprobado: los sismos de poca intensidad abundan mucho más que los de gran intensidad. La pendiente de la recta de regresión que resulta de representar gráficamente la frecuencia acumulada de terremotos en función de la magnitud sísmica (que los sismólogos denominan el valor *b*) tiene un valor próximo a uno, de modo que el número de terremotos se multiplica por diez por cada disminución de una unidad en la magnitud. Determinados el valor *b* y la constante de proporcionalidad de la

ecuación, se puede calcular el intervalo de recurrencia medio correspondiente a terremotos de cualquier magnitud.

Utilizando el recuento de los terremotos ocurridos en la zona de Nuevo Madrid, compilado por Otto W. Nuttli, de la Universidad de San Luis, y el registro de los fenómenos detectados desde 1974, me he servido de la ecuación para estimar diversos períodos de recurrencia en la región citada. Los períodos de recurrencia tienen unos intervalos muy dispares. Así, mientras los terremotos de magnitud 1 (como ya apunté antes) ocurren prácticamente día sí día no, los que muestran violencia suficiente para producir daños estructurales importantes (de magnitud 6, aproximadamente) se repiten sólo con períodos que van de 40 a 80 años. Es improbable que se repita un acontecimiento de magnitud superior a 8, como los de 1811-12, en intervalos menores que los comprendidos entre los 600 y los 1800 años. Naturalmente, cuanto mayor sea la magnitud seleccionada tanto mayor será la incertidumbre estadística. De ello se deduce que las estimaciones que puedan darse son de escasa utilidad práctica a la hora de calcular los riesgos. Además, ni siquiera las estimaciones empíricas concuerdan con los resultados obtenidos por Russ a partir de los sedimentos tectonizados de Lake County.

Aunque la frecuencia de los grandes terremotos de la región de Nuevo Madrid no pueda calcularse con la debida precisión, sí pueden en cambio realizarse estimaciones bastante fiables del alcance de los daños que se producirían caso de ocurrir un terremoto de ese tipo. Supongamos, por ejemplo, que se repitiera la sacudida más fuerte de 1812. La capital más vulnerable, en la región de Nuevo Madrid, es Memphis. Sus normas de edificación no contemplan ninguna ordenanza especial en previsión de temblores. Además, al estar construidos sobre los sedimentos no consolidados del valle del Mississippi, los edificios son mucho más vulnerables a los terremotos que si estuvieran levantados sobre roca madre.



ZONAS DAÑADAS en el caso de que se repitiera un terremoto de magnitud 8,6 en la zona sísmica de Nuevo Madrid, según cálculos de Otto W. Nuttli, de la Universidad de San Luis, comparadas con las correspondientes al terremoto de San Francisco de 1906. Ambos terremotos tendrían parecida magnitud. Las zonas dañadas serían muy diferentes, ya que las rocas corticales del oeste atenuarían las sacudidas sísmicas en distancias mucho menores que la corteza de la parte central de los Estados Unidos. Las regiones en color marcan el territorio donde las estructuras de los edificios sufrieron daños en la zona de San Francisco y donde cabría esperarlos si se produjera un nuevo gran terremoto en Nuevo Madrid. La zona en gris de California indica daños en los edificios comprendidos en el intervalo daños menores-daños importantes. La zona gris más interna, que rodea la zona central afectada de Nuevo Madrid, define el radio de destrozo grave de los edificios, mientras que la gris circundante indica una menor incidencia de esos daños. Los círculos de color representan centrales nucleares en funcionamiento y las circunferencias, también de color, señalan centrales en proyecto o en construcción, que evitan la zona de Nuevo Madrid.

En 1974, Clarke Mann y Warner Howe, ingenieros consultores de Memphis, junto con Frederic H. Kellogg, de la Universidad estatal de Memphis, calcularon el riesgo sísmico de la ciudad. El estudio fue encargado por el Departamento de la Vivienda y Desarrollo Urbano. Si se produjera un terremoto (como el de mayor intensidad ocurrido hasta ahora en la región de Nuevo Madrid) en el año 2000 y en horas diurnas, morirían, según estos autores, más de 3000 personas y los daños ocasionados a las edificaciones rebasarían los 1300 millones de dólares de 1970.

Pero un terremoto de esa potencia no dañaría sólo a la ciudad de Memphis. Cómputos similares realizados por Nuttli, a instancias de la Federal Emergency Management Agency, predecían daños estructurales en los edificios y puntos estratégicos de importancia vital (puentes, red viaria y de agua, etcétera), no sólo en Tennessee, sino también en otros seis estados: Arkansas, Illinois, Indiana, Kentucky, Mississippi y Missouri. Esto equivale a una expansión de la catástrofe superior a la que cabría esperar de un terremoto de magnitud similar que se localizara en California. ¿Por qué ese privilegio? Debido a que la corteza de la parte occidental de los Estados Unidos atenúa las ondas sísmicas en distancias mucho más cortas que las correspondientes rocas corticales de la parte central del país. Las estimaciones provisionales de daños realizadas por el citado organismo y referentes a esa extensa región, considerando sólo los destrozos de los edificios, se situaban entre los 13.000 y 14.000 millones (dólares de 1980).

Aun cuando el ciudadano medio prefiere ignorar los riesgos que presenta la zona sísmica de Nuevo Madrid, sobre todo si tiene en cuenta que entre dos fuertes terremotos transcurrirán varios cientos de años, no deben hacerlo los arquitectos, urbanistas y responsables en general de las instalaciones y servicios que encierren una importancia crítica para la comunidad. La localización y la construcción de centrales nucleares, que dependen en buena medida de lo que dicten los cálculos de riesgo sísmico previsible, constituyen un caso manifiesto. Las centrales norteamericanas, en fase de construcción o ya terminadas, cumplen los requisitos de resistencia a dos tipos de terremotos hipotéticos.

Uno de ellos dejaría a la central "en condiciones de funcionamiento" (*o*perating *b*asis *e*arthquake, OBE), es decir, no perjudicaría a la estructura de la misma para seguir funcionando sin peligro. El otro obligaría al "cierre por seguridad" (*s*afe *s*hutdown *e*arthquake, SSE), es decir, clausuraría la central pero permitiría el funcionamiento de todos los sistemas de seguridad pública. Un hipotético temblor del tipo SSE, de intensidad doble de la del tipo OBE, representa el movimiento potencial máximo del suelo estimado para la zona de su influencia; generalmente la probabilidad de que se produzca es muy baja. Son tan grandes las vibracio-

nes supuestas para la mayor parte de la zona central de los Estados Unidos (en la eventualidad de que ocurriera un terremoto de la violencia del mayor de 1812) que, para cumplir las normas de seguridad propias de una sacudida tipo SSE, los costes de construcción resultan prohibitivos. Por esa razón no se han construido centrales nucleares en la depresión del Mississippi; por idéntico motivo las normas de construcción de las instalaciones nucleares de sus cercanías contemplan la obligación de resistir a un terremoto de intensidad máxima (como el de Nuevo Madrid) que se produjera en la parte de la zona fallada más próxima a la central.

El riesgo sísmico le plantea un dilema a la industria de la energía nuclear. Por un lado, un exceso de conservadurismo en las normas de construcción de centrales puede significar un incremento de decenas de millones de dólares en los costos. Por otro, la Comisión de Reglamentación Nuclear no puede ignorar, y de hecho no ignora, la posibilidad de que la zona sísmica de Nuevo Madrid se extienda centenares de kilómetros hacia el nordeste, siguiendo el sistema de fallas del río Wabash, adentrándose en el estado de Indiana. También es cierto que, hasta que no se comprenda mejor por qué es activa la región de Nuevo Madrid, mientras que otras zonas continentales falladas similares no presentan fenómenos sísmicos perceptibles, nadie puede asegurar que las zonas hoy en día inactivas no puedan, en el futuro, originar grandes terremotos. Así, por ejemplo, existen muchas fallas y agrietamientos antiguos e inactivos en la parte oriental de los Estados Unidos. ¿Acaso deberían proyectarse entonces todas las instalaciones nucleares de esta región según normas que permitan resistir la liberación de grandes cantidades de energía, producidas por posibles terremotos de elevada intensidad?

Sólo tendremos respuesta a esta y muchas otras preguntas cuando hayamos avanzado en el conocimiento de la geología y geofísica. Empero, la exploración continuada del vasto y complejo laboratorio natural que constituye lo que denominamos la zona sísmica de Nuevo Madrid proporcionará un conocimiento más profundo del contexto geológico general. No se pretende sólo satisfacer la natural curiosidad del hombre por conocer la razón de las cosas, sino, también, prepararnos mejor para el día en que, inevitablemente, Nuevo Madrid torne a temblar con violencia.

Ciencia y sociedad

Complicaciones mortales

En abril de 1935, Leonard Thompson, de 27 años, ingresaba en el Hospital General de Toronto. La semana anterior a su admisión la había pasado con náuseas y vómitos. Se le diagnosticó una grave cetoacidosis, un aumento de la acidez de los líquidos corporales, complicación habitual en pacientes de diabetes. En el registro hospitalario se anotó que Thompson padecía diabetes mellitus desde hacía 15 años, y se administraba insulina desde hacía 13. Pese al desesperado intento por salvarle la vida, su extremada debilidad le condujo a la muerte el tercer día de estancia en el hospital.

De no ser por dos detalles, la muerte de Leonard Thompson no hubiera llamado la atención. Era la primera persona a quien se trató la diabetes con insulina; es más, la creencia general era que se hallaba libre de los efectos de la diabetes a partir del tratamiento con insulina y que murió en un accidente de moto. Gerard N. Burrow, Barbara E. Hazlett y M. James Phillips, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Toronto, presentan ahora en las páginas de *The New England Journal of Medicine* una revisión del caso Thompson. Prueban que murió de pneumonía, pero que en el momento de su muerte presentaba varias complicaciones características de la diabetes.

El fallecimiento de Thompson pone sobre el tapete otro hecho que ha venido destacándose a lo largo de los 60 años transcurridos desde que recibiera la primera inyección de insulina. En contra de lo que se creyó en un principio, la insulina no cura la diabetes; no es más que un recurso para controlar el síntoma principal de la enfermedad, a saber, el elevado nivel de glucosa en sangre. De las dos formas principales de diabetes, la que se conoce como diabetes mellitus es, en general, más precoz y de peores consecuencias. Débese a la incapacidad del páncreas para elaborar suficiente insulina, hormona proteica indispensable para la degradación de los carbohidratos.

A principios de 1922, Frederick G. Banting, ortopeda, Charles H. Best, estudiante, J. J. R. Macleod, fisiólogo, y J. D. Collip, bioquímico, que trabajaban juntos en Toronto, purificaron un extracto de tejido pancreático que reducía los niveles de glucosa sanguínea en perros. Tras demostrar, Banting y Best, la inocuidad del extracto inyectándoselo en ellos mismos, se aprestaron a ensayarlo en diabéticos. Thompson, que por entonces contaba 13 años de edad, había ingresado en el Hospital General de Toronto en diciembre de 1921. Al administrarle el extracto pancreático, el 11 de enero de 1922, su nivel de glucosa en sangre descendió drásticamente. El 23 de enero se le inyectó un extracto más puro, produciéndose un descenso más espectacular todavía. Thompson siguió recibiendo insulina el resto de su vida.

El episodio constituyó sin duda un avance terapéutico de la mayor importancia; hasta entonces, el único tratamiento de la diabetes consistía en seguir una estricta dieta alimenticia. Como escriben Burrow y sus colegas, al poco del primer tratamiento de Thompson "abundaron las comunicaciones que atribuían a la insulina la curación de la diabetes mellitus". La verdad es que los riesgos y ventajas de las inyecciones de insulina son más complejos. El editorial que acompaña al artículo de Burrow y colaboradores señala que "el caso fue el primer ejemplo de conversión de lo que hoy denominamos diabetes insulino-dependiente, de enfermedad aguda y fatal, en trastorno crónico con complicaciones degenerativas".

La autopsia de Thompson señalaba que el finado presentaba varias complicaciones de ésas: aterosclerosis generalizada, aumento del tamaño del hígado y patologías del sistema nervioso central. Es hoy conocimiento común que el protocolo habitual basado en la inyección diaria de insulina extraída del cerdo o del ganado vacuno no es capaz de controlar esos efectos colaterales.

Están en marcha tres vías de investigación para mejorar el tratamiento de la diabetes. Se centra la primera en el desarrollo de métodos que liberen insulina al torrente sanguíneo de acuerdo con los cambios que registre el nivel de la glucosa hemática, y no según un patrón regular. Tal estrategia, que imitaría el ritmo de liberación de insulina del propio organismo, habría de recurrir a prótesis quirúrgicas que contuvieran la hormona. Sin duda proporcionaría un control mucho más ajustado de los niveles de glucosa en sangre. La segunda vía es la síntesis de insulina humana. Se ha sugerido que quizá nuestra insulina controle mejor los efectos colaterales que las de origen animal. Es obvio que la disponibilidad de insulina humana es hoy muy limitada. Sin embargo, las nuevas técnicas genéticas han permitido ya la síntesis de proteínas humanas en bacterias. Por último, se piensa en el trasplante de células o tejido del páncreas de individuos sanos; el procedimiento quirúrgico se encuentra en fase de experimentación.

Inmunodinámica cuántica

La respuesta inmune comienza con la unión de un antígeno extraño a los receptores de superficie de una célula denominada linfocito *B*; se estimula con ello la proliferación de la célula y su elaboración de anticuerpos frente al antígeno. Los receptores señalan el tipo particular de anticuerpos que sintetiza la célula. Su especificidad es el resultado final de un complejo proceso de redistribución génica que ocurre a lo largo del desarrollo de la célula *B*.

El desencadenamiento de la respuesta inmune, sin embargo, ha dado lugar a buen número de intrigantes observaciones, que no han recibido hasta ahora explicación satisfactoria. Así, la forma acampanada de la curva dosis-respuesta: las células aumentan la síntesis de anticuerpo a medida que crece la cantidad de antígeno, pero sólo hasta cierto valor máximo, a partir del cual la producción de anticuerpo desciende a medida que sube la dosis de antígeno. Por otro lado, los antígenos muestran mayor inmunogenicidad si son multivalentes, esto es, si presentan a la célula *B* varios sitios idénticos capaces de actuar de epitopos, o determinantes antigénicos, que encajan en el sitio de unión del anticuerpo. Las superficies de una bacteria, un virus o un grano de polen están sembradas de esos epitopos; las partículas menores, "no autónomas", como la mayoría de las proteínas, sólo son inmunogénicas si presentan determinado grado de agregación. Los pequeños haptenos se unen rápidamente a los anticuerpos, pero sólo estimulan una respuesta inmune inicial si se sitúan sobre una proteína transportadora, de mayor tamaño.

¿Qué tipo de mecanismo explicaría esas observaciones? Tres investigadores de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins postulan que el proceso de disparo está cuantificado. Sostienen que a los epitopos de un antígeno deben unirse un número mínimo de receptores de la célula *B*;

los receptores se reúnen entonces en un racimo, el llamado inmunón. La formación de un número suficiente de inmunones desencadena el proceso que conduce a la elaboración masiva de anticuerpos. Se ha incorporado la teoría del inmunón en un modelo matemático que efectúa predicciones, sometidas luego a comprobación experimental. Howard M. Dintzis, Renee R. Dintzis y Bert Vogelstein han descrito el modelo en dos recientes colaboraciones en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, donde exponen las predicciones y su confirmación experimental.

Dintzis, Dintzis y Vogelstein basan su teoría en observaciones generales del tipo de las mencionadas más arriba y en experimentos efectuados con antígenos artificiales: polímeros lineales unidos a numerosos haptenos. (De polímero usaron la poliacrilamida y, como haptenos, grupos dinitrofenilos.) Observaron que los polímeros eran inmunogénicos en el caso exclusivo de que portaran de 14 a 21 haptenos eficaces (espaciados convenientemente). Las moléculas menores, que portaban de siete a nueve haptenos eficaces, no estimulaban la síntesis de anticuerpos; es más: inhibían el desencadenamiento de la respuesta inmune por moléculas mayores.

La teoría del inmunón afirma que una célula *B* capaz de responder a una molécula portadora de haptenos posee en su superficie un elevado número de receptores específicos para haptenos. La unión secuencial de los receptores a los haptenos de una misma molécula inmunogénica conduce al apiñamiento de los receptores (que corren libremente por la superficie de la membrana celular). Cuando el racimo alcanza un número crítico de receptores unidos a polímeros, sufre una lenta transformación estructural que le convierte en inmunón. Si se forma un número suficiente de inmunones, la célula recibe un estímulo. Así, la fuerza de la respuesta inmune primaria guarda relación con el ritmo de formación de inmunones en la población de células dotadas de receptores para un determinado hapteno. Se define una molécula inmunogénica como la que es capaz de unir, al menos, el número crítico de receptores. La presencia de un número excesivo de moléculas inmonogénicas reduce el tamaño medio de los racimos, pues los receptores, en vez de unirse a muchos haptenos de una misma molécula y apiñarse, se enlazan a haptenos de moléculas distintas. Ello podría explicar la caída que presentan las curvas de dosis-efecto. Los polímeros que no presentan un efecto inmunogénico muy pronunciado (porque portan escasos haptenos) compiten también improductivamente por los sitios receptores, lo que quizás explique el efecto inhibidor de las moléculas pequeñas.

El modelo matemático desarrollado por Dintzis, Dintzis y Vogelstein es un conjunto de ecuaciones que describen la formación de inmunones en presencia de moléculas inmunogénicas y no inmunogénicas. A partir de las ecuaciones dibujaron curvas de predicción de la respuesta frente a distintas dosis de un antígeno inmunogénico y del efecto inhibidor de varias dosis de otro no inmunogénico. Ensayaron las predicciones inyectando polímeros con haptenos en ratones e incubando con polímertos células del sistema inmune (del bazo de ratón). Los datos de formación de anticuerpos en ambos tipos de experimentación concordaban notablemente con las curvas calculadas.

¿Qué se esconde tras el horizonte negro?

En el modelo cosmológico convencional de la gran explosión, la expansión observada del universo se extrapola hacia atrás en el tiempo hasta llegar a una singularidad: un estado hipotético de materia infinitamente densa y caliente en la geometría tetradimensional del espacio-tiempo. La singularidad explotó creando la bola de fuego primordial de la que andando el tiempo surgirían galaxias y estrellas. La prueba más decisiva en favor de esta perspectiva, aparte de la propia expansión del universo, es la radiación cósmica de fondo en microondas. La mayoría de los cosmólogos mantienen que este débil y omnipresente ruido de radio es un resto de la radiación térmica de alta energía que dominaba el universo inmediato a la gran explosión.

Pero esta interpretación tiene un punto flaco: el fondo cósmico de microondas posee una isotropía casi perfecta, vale decir, la intensidad y la "temperatura" de la radiación son esencialmente uniformes en todas las direcciones. La isotropía implica que las diferentes partes del universo primitivo estuvieron en mutuo equilibrio térmico. Ahora bien, si la bola de fuego primordial se originó en una singularidad, su expansión inicial debió haber sido demasiado rápida para que los distintos puntos del universo se hallaran causalmente conectados, aun cuando ello fuera a través de ondas luminosas. Por tanto, el modelo convencional de la gran explosión, al no admitir tiempo suficiente para que se llegase al equilibrio térmico, parece violar el principio de causalidad.

Para paliar esa objeción, se han propuesto varias versiones modificadas del modelo. Supone una de ellas que el universo tuvo una primitiva fase de densidad constante, y muy alta, aunque menor que la densidad infinita de una singularidad. El estado postulado es característico de una clase particular de espacio-tiempo curvado, el denominado espacio de de Sitter, en honor del astrónomo y matemático holandés Willem de Sitter, quien definió matemáticamente sus propiedades en 1917. Al permitir que las partes del universo primitivo dispusieran de más tiempo para mantenerse comunicadas entre sí, estos modelos superan el problema de la causalidad.

Un nuevo modelo de este tipo, formulado por J. Richard Gott III, de la Universidad de Princeton, da un paso más. El origen del universo se remontaría a la aparición espontánea de una burbuja de baja densidad en el espacio de de Sitter primordial de alta densidad. Las ventajas de este modo las enumera Gott en *Nature*. En común con otros modelos modificados de la gran explosión, el de Gott supone que no se parte de una singularidad y permite que las distintas regiones del universo primitivo estén conectadas causalmente. Las ideas de unas burbujas que aparecieran espontáneamente en el espacio de de Sitter no es exclusiva del modelo de Gott. Con todo, el universo burbuja de Gott presenta varios rasgos novedosos. Por un lado, de acuerdo con Gott, fuera de la burbuja habría un horizonte de sucesos. La luz procedente de ciertas regiones del espacio primordial de de Sitter situadas más allá de la pared de la burbuja nunca podría alcanzar a un observador encerrado en esa pompa.

La noción de horizonte de sucesos resulta más familiar dentro de un contexto de agujeros negros: emplazamiento de una masa sumamente compacta, una estrella colapsada por ejemplo, cuyo campo gravitacional es lo bastante fuerte para impedir que la luz escape. En 1974 el astrofísico británico Stephen Hawking realizó un notable descubrimiento a propósito de este horizonte de sucesos: podía emitir radiación. De acuerdo con la mecánica cuántica, por doquiera del espacio-tiempo se crean pares de partículas y antipartículas continuamente. La partícula y la antipartícula suelen alejarse muy poco antes de volver a unirse y aniquilarse mutuamente. Hawking ha

demostrado que en las proximidades de un agujero negro un miembro del par puede caer dentro del horizonte de sucesos del agujero negro, dejando libre al otro miembro, que escapa. La aparente radiación térmica emitida cerca de un horizonte de sucesos se denomina radiación de Hawking.

El horizonte de sucesos que rodea un agujero negro formado por una estrella colapsada produciría muy poca radiación de Hawking, imposible de detectar. Sin embargo, en el modelo de Gott, la cantidad de radiación de Hawking generada por el horizonte de sucesos cosmológico asociado con el hipotético universo burbuja sería enorme. En los primeros 10^{-42} segundos, más o menos, tras la aparición de la burbuja, la radiación se enfriaría lo bastante para formar toda la materia (y la antimateria) del universo. A partir de aquí la expansión del universo proseguiría tal cual señala el modelo estándar de la gran explosión. La radiación cósmica de fondo en microondas sería el resto de la radiación de Hawking primordial, y habría que atribuir la isotropía observada del fondo cósmico a la uniformidad del horizonte de sucesos cosmológico primitivo en el espacio de densidad constante de de Sitter.

Como Gott indica, la hipótesis de que el universo primitivo estuviese lleno de una intensa radiación de Hawking es coherente con las recientes teorías de gran unificación de las interacciones entre las partículas elementales. Estas teorías abordan la cuestión de cómo habría evolucionado la preponderancia de la materia sobre la antimateria observada en el universo actual, a partir de un estado de radiación térmica pura con iguales cantidades de materia y antimateria. Se ha avanzado que la asimetría provendría de los procesos de desintegración de partículas en la fase de expansión del modelo convencional.

Se dice que el universo burbuja de Gott es abierto, esto es, que es de extensión infinita y que proseguirá su expansión indefinida. Con todo, puede coexistir en el espacio-tiempo con otros universos burbuja, y quizá con un número infinito de ellos. Estos universos abiertos distintos, escribe, procederían todos del mismo caliente y denso espacio de de Sitter "como burbujas de un líquido en ebullición". Mas, debido a que trascienden nuestro horizonte cosmológico de sucesos, no estarían causalmente conectados con nuestro universo (ni siquiera entre dos de ellos). No habría manera, pues, de detectarlos nunca.

Complejos gigantes de nubes moleculares en la galaxia

No obstante ser los objetos de mayor masa de la galaxia, constan casi exclusivamente de moléculas de hidrógeno y originan también la mayor parte de las estrellas

Leo Blitz

Los astrónomos que estudian la formación de las estrellas se enfrentan con problemas similares a los que en el siglo XIX encontraban los fisiólogos a la hora de abordar el crecimiento y desarrollo del embrión humano. Mientras se va gestando la estrella, permanece oculta a la visión; la rodea una nube opaca de polvo y gas a partir de la cual se está condensando. De aquí que cuando se dispersa la nube y la estrella se deja, por fin, ver, los procesos que la hacen brillar se hallan muy avanzados. Al igual que el niño recién nacido, la estrella ha borrado el rastro de la manera como se formó.

Pero hay un punto en el tema de la formación de las estrellas que comienza a desvelarse. Desde hace algún tiempo sabemos ya que, a gran escala, los brazos espirales de las galaxias en forma de disco, la nuestra por ejemplo, vienen a ser una suerte de salas de maternidad de estrellas. Más reciente es el descubrimiento de que los lugares de nacimiento específicos para la mayoría de las estrellas que hoy se están originando en los brazos espirales de nuestra galaxia son complejos gigantes de nubes, compuestas principalmente de moléculas de hidrógeno. Estos complejos comparten con ciertos cúmulos estelares la distinción de ser los objetos de mayor masa de la galaxia. Pero abundan mucho más los primeros. Contienen una fracción apreciable de todo el gas existente en la galaxia. Lo que no impidió que, diez años atrás, todavía se les desconociese por completo.

Gas interestelar

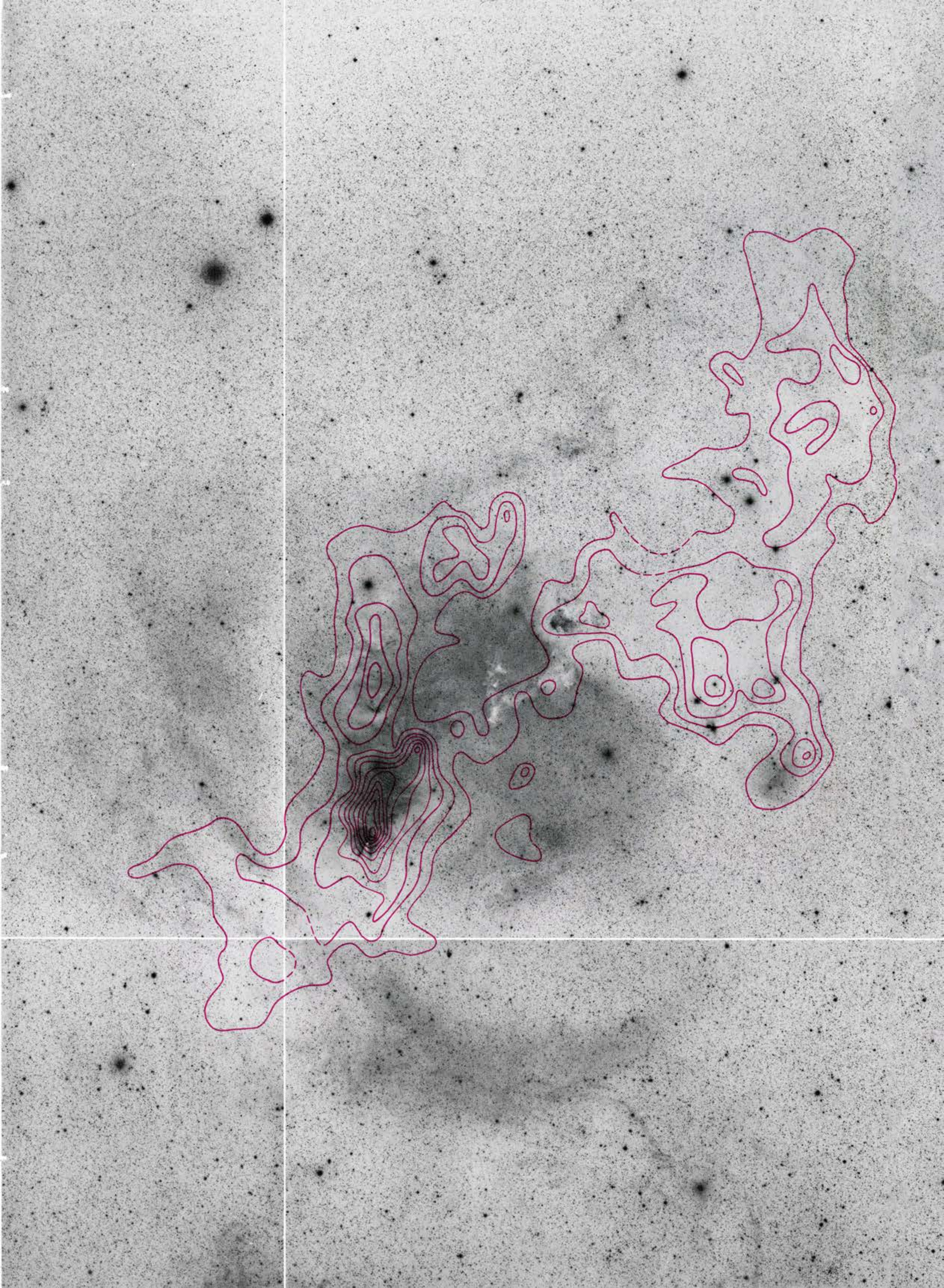
La explicación de los complejos gigantes de nubes moleculares empieza por la descripción de la materia que las constituye, esto es, la materia del espacio interestelar. Con la vista levantada al cielo nocturno cualquiera diría que el espacio entre las estrellas está vacío. Pero en ninguna parte de nuestra galaxia hay una total ausencia de materia. La materia, eso sí, está extremadamente enrarecida: la densidad media de átomos de hidrógeno (el elemento más abundante) en el espacio interestelar no llega a un átomo por centímetro cúbico. La materia interestelar toma muchas formas. En algunos lugares es una nebulosa gaseosa y brillante; en otros, oscuras manchas en el cielo, que se observaron primero porque interceptaban la luz de las estrellas situadas detrás de ellas. Dondequiera que los astrónomos miren, y al parecer, con independencia de la escala que elijan para sus observaciones, la materia interestelar no es uniforme. La materia encerrada entre las estrellas se organiza aquí y allá, en regiones de alta y otras de baja densidad. Se llaman nubes a las regiones de alta densidad, y gas interpuesto entre las nubes, a las de baja densidad.

Hasta época reciente, se creía que las nubes estaban formadas por átomos de hidrógeno con una pequeña mezcla (alrededor del 10 por ciento) de átomos de helio e indicios (sumando un porcentaje muy pequeño) de átomos más pesados que los de helio. También se suponía (y se sigue opinando igual) que alrededor de un 1 por ciento de la masa de la nube lo integraban partículas sólidas de polvo de tamaño microscópico. Las partículas de polvo atenúan la luz de las estrellas de fondo: la absorben en las longitudes de onda del visible y la vuelven a radiar en el infrarrojo. Como resultado, las nubes tienden a ser opacas.

A lo largo de los últimos diez años, esta idea sobre la composición de las nubes ha cambiado en un punto: se ha descubierto que muchas de las nubes no están constituidas por átomos, sino por moléculas. Se trata de una diferencia crucial: las nubes moleculares son mucho más frías y densas que las atómicas. El punto de vista que hoy goza de mayor aceptación afirma que entre el 10 y el 50 por ciento del gas de la galaxia es molecular. Las nubes o son moleculares o son atómicas, y una cosa u otra poco menos que enteramente. Mas, según parece, las nubes moleculares mayores están inmersas en envolturas de gas atómico.

Las moléculas constan de dos o más átomos enlazados y forman una estructura estable. Sabemos que es la fracción menor en la que se puede dividir un compuesto sin perder sus propiedades químicas. Las moléculas, como los átomos, emiten y absorben radiación electromagnética solamente en longitudes de onda específicas y características. Cada una de tales longitudes de onda corresponde a una línea espectral:

COMPLEJO MOLECULAR en la constelación del Unicornio. Se trata de una distribución de bolsas de polvo frío y gas molecular situada a unos 800 parsecs (2600 años-luz) del sistema solar. El polvo impide la llegada de la luz de las estrellas situadas detrás, pero la mejor manera de determinar la extensión del complejo es la radiación electromagnética que las moléculas de monóxido de carbono emiten desde el interior del complejo a una longitud de onda de 2,6 milímetros. Aquí, la configuración de la radiación, cartografiada por el autor con el telescopio de 1,2 metros del laboratorio Pupins de Física de la Universidad de Columbia, se representa en forma de curvas de nivel sobre un mosaico de cuatro placas de la Exploración del Cielo de Monte Palomar. Las curvas de nivel sugieren que el complejo consta de dos nubes unidas por un delgado puente. La nube inferior queda detrás de una nebulosa luminiscente. (Las fotografías son negativos: la nebulosa aparece oscura.) La nebulosa está formada por hidrógeno que se ha disociado en átomos, ionizados por la radiación ultravioleta procedente de una única estrella de gran masa, visible en forma de punto negro en la parte alta de la bolsa más densa de la nube inferior.



un estrecho máximo (o línea brillante) en el espectro de la radiación emitida por la molécula o una brusca atenuación (o línea oscura) en el espectro de la radiación que pasa a través de un gas formado por tales moléculas. Para una molécula típica hay cientos de líneas espectrales detectables; la longitud de onda de cada línea se puede medir, generalmente, con una precisión superior a una parte en un millón. De aquí que si se detectan varias líneas en la radiación procedente de una dirección particular del cielo, y si se sabe que las líneas caracterizan una molécula particular, la probabilidad de un error en su identificación resulta ser extremadamente pequeña.

Moléculas en rotación

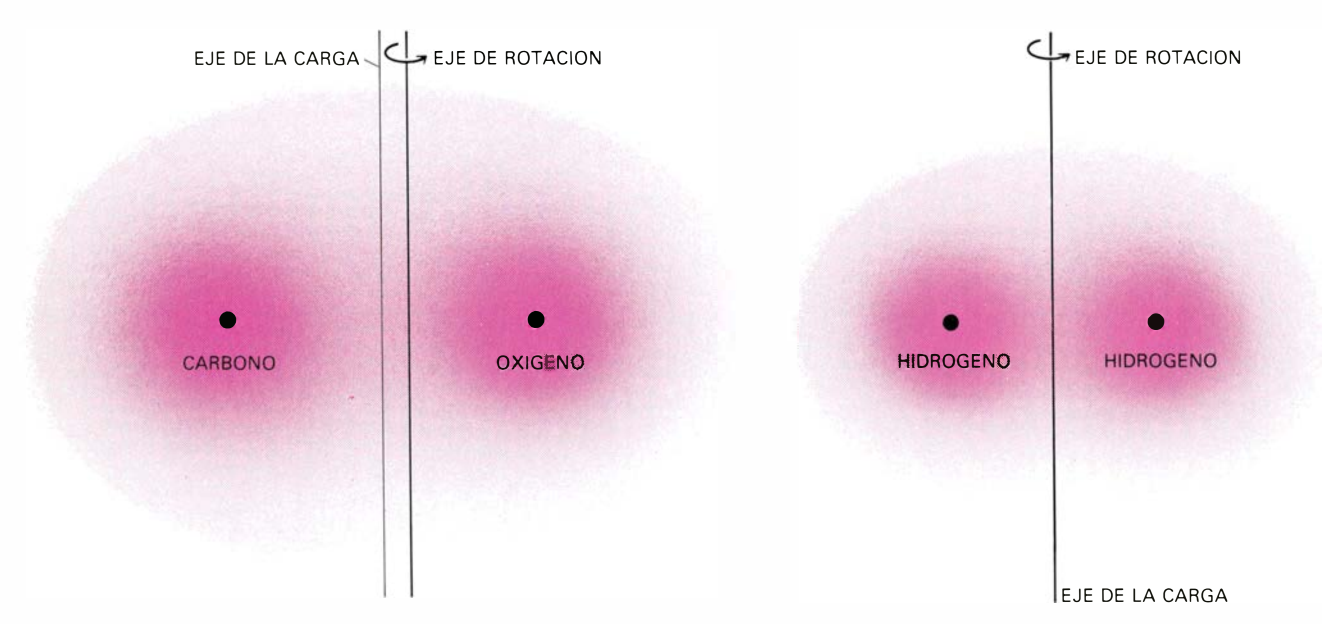
Esto no quiere decir que sea inmediata la identificación de las moléculas en un complejo gigante de nubes moleculares. ¿Por qué razón? La dificultad más notable estriba en que las moléculas de hidrógeno no se pueden identificar directamente a partir de su radiación a la temperatura en torno a 10 grados Kelvin (10 grados Celsius por encima del cero absoluto), que es la típica para la mayoría de las partes de una nube molecular. Las moléculas de un complejo gigante de nubes moleculares suelen hallarse en rotación, y ésta, vista desde cierta distancia, equivale a una oscilación periódica de los electrones de la molécula. En efecto, la rotación determina que los electrones vayan y vuelvan de modo muy parecido a como lo harían en una antena de radio. Una molécula en concreto gira sólo a velocidades angulares discretas; la transición de una mayor a otra menor va acompañada de la emisión de radiación por los electrones.

Se cree que el 99 por ciento de la masa de una nube molecular gigante es hidrógeno molecular. Ahora bien, la molécula de hidrógeno es simétrica respecto a su eje de rotación. Por tanto, la posición media de los dos electrones en la molécula se encuentra en el eje de rotación. Resulta de ello que la rotación de cada molécula (vista desde cierta distancia) no está acompañada de una oscilación de los electrones. Lo que es más importante, la variación en el estado rotacional de la molécula no implica la emisión de radiación.

Afortunadamente, muchas de las moléculas presentes en cantidades ínfimas en un complejo gigante de nubes moleculares no son simétricas alrededor de su eje de rotación. En tales moléculas, la posición media de los electrones se encuentra a cierta distancia del eje. Los choques entre moléculas (tanto simétricas como asimétricas) en un complejo son lo bastante frecuentes y de suficiente energía para dar lugar a numerosas transiciones entre los estados de rotación. Las transiciones de las moléculas asimétricas explican la radiación que emite el complejo. La radiación tiene una longitud de onda entre algunos centímetros y una fracción de milímetro; consiguientemente, se puede detectar con radiotelescopios desde la Tierra.

Hasta ahora se han identificado, en firme, 53 moléculas en el espacio interestelar y otras cuatro más de una manera provisional. Muchas, entre las que se cuentan varias de las más abundantes, son moléculas sencillas que hallamos también en la Tierra; valgan los cuatro ejemplos siguientes: H_2O (agua), CO (monóxido de carbono), NH_3 (amoniaco) y H_2CO (formaldehído). Muchas otras, así OH y HCO^+, sólo las conocemos, aquí, en el laboratorio; se muestran demasiado activas para existir a las densidades típicas de la materia en la Tierra. Y las hay como C_4H, HC_7N y HC_9N, que nunca se han observado en la Tierra, ni siquiera en los laboratorios. Se han inferido en el espacio interestelar a partir de cálculos teóricos. ¿De qué manera? Asignar una línea espectral, no explicable por otra vía, a cierta molécula hipotética, permite predecir las longitudes de onda de otras líneas en el espectro de la molécula. La subsiguiente detección de algunas de esas otras líneas confirma la presencia de la molécula.

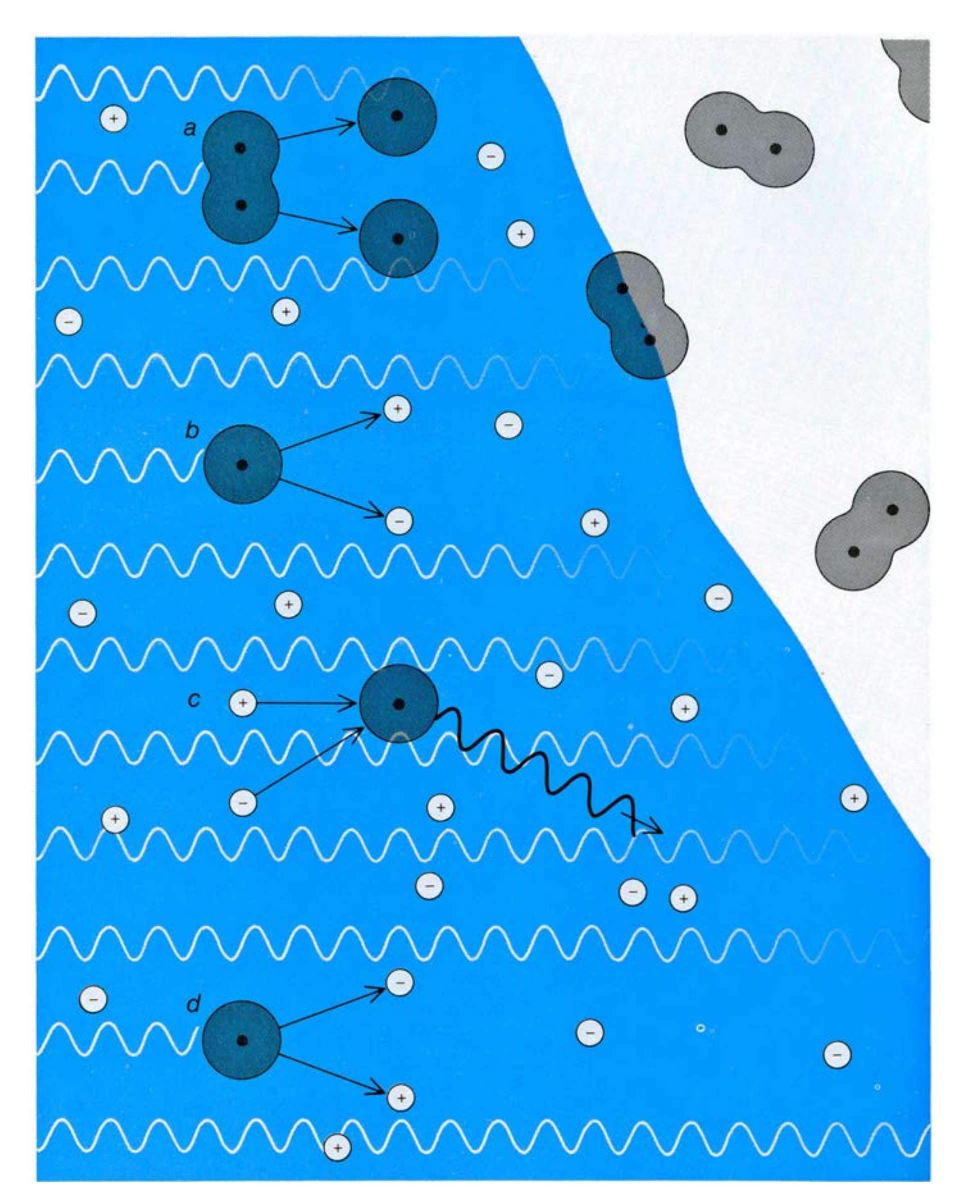
Una de las moléculas gaseosas más complejas detectadas hasta ahora en el espacio interestelar es el CH_3CH_2OH, conocido en la Tierra como alcohol etílico o etanol. Según Ben M. Zuckerman, de la Universidad de Maryland en College Park, y sus colaboradores, la cantidad de esta materia en el centro de nuestra galaxia podría llenar 10.000 veces el volumen de la Tierra. Estimas del



LAS MOLECULAS EN ROTACION son la fuente de la radiación electromagnética detectada en los complejos moleculares gigantes. El monóxido de carbono (*izquierda*) es una molécula asimétrica: su átomo de oxígeno tiene una masa mayor que su átomo de carbono; de ahí que la molécula gire en torno a un eje que está más próximo al primero de ellos. La asimetría resultante de la carga eléctrica de la molécula alrededor del eje de rotación significa que la carga oscila mientras gira la molécula. Cuando la velocidad de giro disminuye de un valor discreto a otro, la molécula emite radiación a longitudes de onda características. El hidrógeno (*derecha*) es una molécula simétrica: no emite radiación por el mero hecho de girar. El hidrógeno molecular no se pueda identificar directamente en la mayoría de los complejos moleculares gigantes, aun cuando constituya más del 99 por ciento de la masa del complejo.

contenido de agua en las nubes moleculares que contienen alcohol etílico indican, sin embargo, que el agua es 100.000 veces más abundante. El alcohol está, pues, embotellado en la nube con una graduación de sólo 0,002. Se encuentra reforzado, además, con materias tan poco potables como el HCN (cianuro de hidrógeno).

De todas las moléculas gaseosas detectadas hasta la fecha, la gran mayoría están formadas por hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno. (Algunas, pocas, contienen silicio y azufre.) Esta composición refleja las abundancias cósmicas relativas de los elementos químicos. El hidrógeno y el helio (que no se encuentra en moléculas porque es químicamente inerte) constituyen los principales elementos que se formaron cuando comenzó el universo; por su parte, el carbono, nitrógeno, oxígeno y helio son los principales elementos producidos por fusión nuclear en el interior profundo de las estrellas. Los elementos sintetizados dentro de las estrellas salen lanzados al espacio interestelar de diversas maneras. Algunas estrellas (tal vez todas) emiten "vientos" de partículas, que incorporan los núcleos atómicos sintetizados por fusión nuclear. Las hay que desprenden una envoltura externa de materia en el proceso de convertirse en novas. Y, por fin, algunas estrellas explotan catastróficamente y se convierten en supernovas. La mayor parte de su masa se expulsa hacia el espacio interestelar.



LOS ATOMOS QUE SE RECOMBINAN constituyen la fuente de la radiación electromagnética procedente de las nebulosas gaseosas luminiscentes (llamadas por los astrónomos regiones H II) con las que están asociados los complejos gigantes de nubes moleculares como el que aparece representado en la página 49. La radiación ultravioleta procedente de estrellas jóvenes y de gran masa disocia las moléculas de hidrógeno en átomos (*a*); ioniza luego los átomos (*b*), creando así una región ocupada casi totalmente por protones libres (+) y electrones (−). Cuando estas partículas se recombinan para formar átomos (*c*), emiten la radiación que hace visible la nebulosa. Pronto los átomos son ionizados de nuevo (*d*). La mayor parte de la radiación ultravioleta del interior de las regiones H II escapa de ellas sólo después de haberse convertido, a través de esos procesos, en radiación electromagnética de longitudes de onda mayores.

Importancia del CO

La molécula que más ha contribuido a nuestro conocimiento, cada vez mayor, de las propiedades en gran escala que poseen los complejos gigantes de nubes moleculares es la de monóxido de carbono. La identificaron por primera vez en el espacio interestelar Robert W. Wilson, Keith B. Jefferts y Arno A. Penzias, de los Laboratorios Bell. La abundancia del monóxido de carbono en el espacio interestelar se limita a sólo una diezmilésima parte de la del hidrógeno molecular, pero emite fuertemente a bajas temperaturas. No parece haber ninguna otra molécula de las detectadas en el espacio que se manifieste tan coextensiva con el hidrógeno molecular. (Son los choques con el hidrógeno molecular lo que confiere al monóxido de carbono una amplia variedad de estados rotacionales y le permite emitir radiación.) Así, la radiación del monóxido de carbono sirve de trazador del gas interestelar molecular, de la misma manera que el teñido puede revelar estructuras de otra manera no detectadas en los tejidos vivos.

En 1973, Kenneth D. Tucker y Marc L. Kutner, de la Universidad de Columbia, que formaban equipo con Patrick Thaddeus, del Instituto Goddard de Estudios Espaciales, se aprestaron a determinar la extensión de una nube molecular gigante en la proximidad de la Nebulosa Cabeza de Caballo, brillante mancha gaseosa en la constelación de Orión. Hallaron que la nube cubría una superficie que alcanzaba casi seis grados cuadrados de cielo, es decir, 30 veces la superficie cubierta por la Luna.

La gran extensión de la nube planteaba un curioso problema. Los radiotelescopios recogen la radiación procedente de una zona de cielo inversamente proporcional a su diámetro; un gran telescopio proporciona, pues, mediciones de la radiación procedente de pequeñas áreas. El telescopio usado por Tucker, Kutner y Thaddeus era el instrumento de cinco metros del Observatorio McDonald en Texas. Puede medir la radiación debida al monóxido de carbono en manchas circulares del cielo con un diámetro de sólo 2,3 minutos de arco. Con una semana de tiempo de observación, los investigadores exploraron la radiación procedente de sólo 150 posiciones en la nube; para car-

tografiar toda la nube a base de trozos de 2,3 minutos de arco se hubieran necesitado seis meses de trabajo a tiempo completo. En todo caso, se sabe ahora que la nube molecular que ellos estudiaron es una más de las 4000 que habrá, aproximadamente, en la galaxia. Construir un mapa completo de las nubes en la galaxia habría requerido un consumo desorbitado de tiempo.

La manera más sencilla de evitar el problema era proyectar y construir un radiotelescopio menor, que examinara una porción más extensa de cielo en cada observación. Thaddeus procedió así: con estudiantes de los últimos cursos y auxiliares técnicos, proyectó y construyó un telescopio de 1,2 metros en el tejado del Laboratorio Pupins de Física en la Universidad de Columbia, en el centro de Manhattan. Ningún astrónomo profesional había intentado hacer observaciones en la ciudad de Nueva York desde hacía medio siglo; pero, a las longitudes de onda de radio a las que se detecta el monóxido de carbono, Nueva York continúa tan virgen como lo era cuando sólo estaba poblada por indios. (El monóxido de carbono producido hoy por la combustión urbana no afecta a las observaciones astronómicas. Sus líneas espectrales están ensanchadas por la presión de la atmósfera terrestre en grado tal que se pueden eliminar sin ambigüedad de la señal celeste.) El nuevo telescopio de Thaddeus podía explorar, en cada observación, 12 veces más cielo de lo que se podía antes; se logró cartografiar, por primera vez, un gran número de nubes moleculares gigantes, aunque a resolución más baja. El grupo que realizó el trabajo en Columbia estaba formado por Gregory P. Baran, Gordon Chin, Richard S. Cohen, Hong-Ih Cong, Thomas Dame, George R. Tomasevich y el autor.

Mientras tanto, otros astrónomos, que trabajaban con radiotelescopios grandes, exploraron, aunque incompletamente, la distribución del monóxido de carbono en las nubes moleculares gigantes. Charles J. Lada y Bruce G. Elmegreen, del Centro de Astrofísica del Observatorio del Harvard College y del Observatorio Astrofísico Smithsoniano, en colaboración con Anniela I. Sargent, del Instituto de Tecnología de California, cartografiaron la extensión de dos complejos gigantes de nubes. Philip M. Solomon, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, y Nicholas Z. Scoville, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, estudiaron la parte interna de la galaxia y

MOLECULAS IDENTIFICADAS en el espacio interestelar, cuyo número asciende a 53. (Hay cuatro más, indicadas con un signo de interrogación, identificadas provisionalmente.) Con la excepción del hidrógeno, cada una de ellas contribuye con menos del 0,1 por ciento a la masa de un complejo gigante de nubes moleculares típico. Muchas no aportan siquiera el 0,0001 por ciento. Las hay que son comunes en la Tierra; otras, así las largas cadenas molecula-

llegaron a la conclusión de que una porción importante del gas allí existente lo contenían las nubes moleculares gigantes.

Hacia 1977 se había llegado a la conclusión de que las nubes moleculares mayores compartían cierto número de características. En primer lugar, cada nube de esas poseía una masa de entre 100.000 y 200.000 veces la solar. Las nubes constituían, pues, los objetos de mayor masa observados en la galaxia. Los máximos cúmulos globulares de estrellas gozaban de una masa comparable, pero hay aproximadamente 20 nubes moleculares gigantes por cada uno de los cúmulos globulares de la galaxia. En segundo lugar, la densidad del gas en cada nube centuplica la densidad media del medio interestelar. Pese a ello, el interior de una nube está mucho más enrarecido que el mejor vacío producido nunca en los laboratorios terrestres. En tercer lugar, el gas de cada nube está distribuido en bolsas cuya densidad es 10 veces mayor que la densidad media en la nube. En algunas nubes se observan bolsas de gas con densidades muy superiores a ese valor.

A causa de semejante distribución del gas en la nube, ésta recibe la justa denominación de complejo gigante de nubes moleculares. En conjunto, los complejos son de forma irregular, aunque bien definidos en sus límites. Los complejos suelen ser alargados, midiendo en su dimensión mayor no más de 100 parsecs. (Un parsec es 3,26 años-luz, distancia ligeramente inferior a la que separa el Sol de la estrella más próxima a él.) La dimensión típica del diámetro de un complejo se halla en torno a los 45 parsecs.

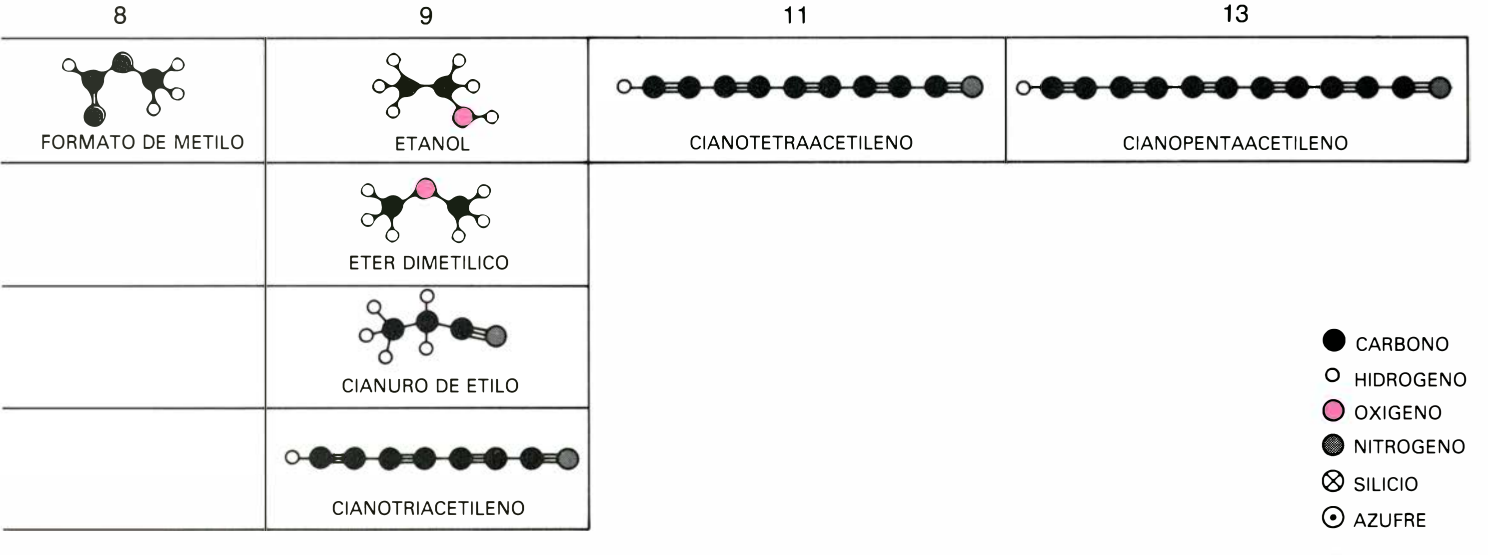
Se sabía también en 1977 que la mayoría de los complejos gigantes de nubes moleculares (si no todos ellos) eran lugares de formación de estrellas. Y hay acuerdo ya en que la mayoría de las estrellas que se están formando ahora en la galaxia lo hacen en el interior de los complejos. Algunas de las indicaciones que condujeron a esta conclusión tienen que ver con la naturaleza de las propias estrellas.

Estrellas de corta vida y gran masa

El Sol es una estrella más. Lo que explica que los astrónomos hayan creído conveniente adoptar su masa y su brillo intrínseco, o luminosidad, como unidades con que medir las de otras. Las estrellas visibles presentan sólo un pequeño intervalo de masas, desde unas 60 veces la solar hasta una doceava parte de ella. El intervalo de luminosidad es mucho mayor. Las estrellas más brillantes, que al propio tiempo poseen la masa mayor, tienen una luminosidad que es casi un millón de veces la solar; las estrellas más tenues resplandecen unas 100.000 veces menos que el Sol. Una estrella agota su combustible nuclear (y por consiguiente su masa) a un ritmo proporcional a aquel con el que emite energía, la mayor parte de ésta en forma de luz visible; de ahí que las estrellas más brillantes agoten su combustible un millón de veces más deprisa que el Sol. Como su masa es sólo 60 veces mayor, se queman a una velocidad mucho mayor. En concreto, las estrellas más brillantes y de mayor masa –las designadas estrellas *O* en la clasificación basada en los espectros estelares– se queman en unos tres millones de años. Se espera que el Sol multiplique por 3000 esa cifra; las estrellas más débiles y de menor masa durarán, se supone, 1000 veces más que el Sol, por lo menos.

Las estrellas *O* de gran masa y corta vida ofrecen la peculiaridad siguiente: emiten la mayor parte de su radiación en la región ultravioleta del espectro. Por ello presentan un aspecto blanco-azulado en el cielo. Lo que es más importante, su copiosa radiación ultravioleta las hace capaces de ionizar mucho del gas interestelar que las rodea. Ello significa que la radiación disocia las moléculas en sus átomos constituyentes y arranca también electrones de las cortezas atómicas. Cuando los electrones libres se recombinan con los núcleos (aunque lo hacen sólo por breve tiempo, antes de volver a ser ionizados), los átomos que forman emiten radiación a longitudes de onda características. Y lo más notable: la recombinación de los electrones con protones para originar átomos de hidrógeno produce una intensa línea espectral roja. Así es como los grupos de estrellas jóvenes suministran la energía necesaria para producir nebulosas gaseosas fluorescentes. Los astrónomos han bautizado esos objetos (de entre los más bellos que se encuentran en el cielo) con el poco agraciado nombre de regiones H II.

Cuando se empezó a buscar el monóxido de carbono con los radiotelescopios, a principio del decenio de 1970, en seguida se hizo patente que los mejores lugares para encontrarlo eran la vecindad de las regiones H II. Se puede decir, por tanto, que los complejos gigantes de nubes moleculares y las regiones H II están íntimamente relacio-



res de cianoacetileno, nunca se han detectado aquí, ni siquiera en los ensayos del laboratorio. En esta ilustración, las moléculas se han agrupado según el número de átomos que poseen. Los ángulos de enlace se han deducido, en parte, de datos espectroscópicos. La lista fue compilada por Paul A. Vanden Bout y Neal J. Evans, de la Universidad de Texas en Austin, y Barry E. Turner, del estadounidense Observatorio Nacional de Radioastronomía.

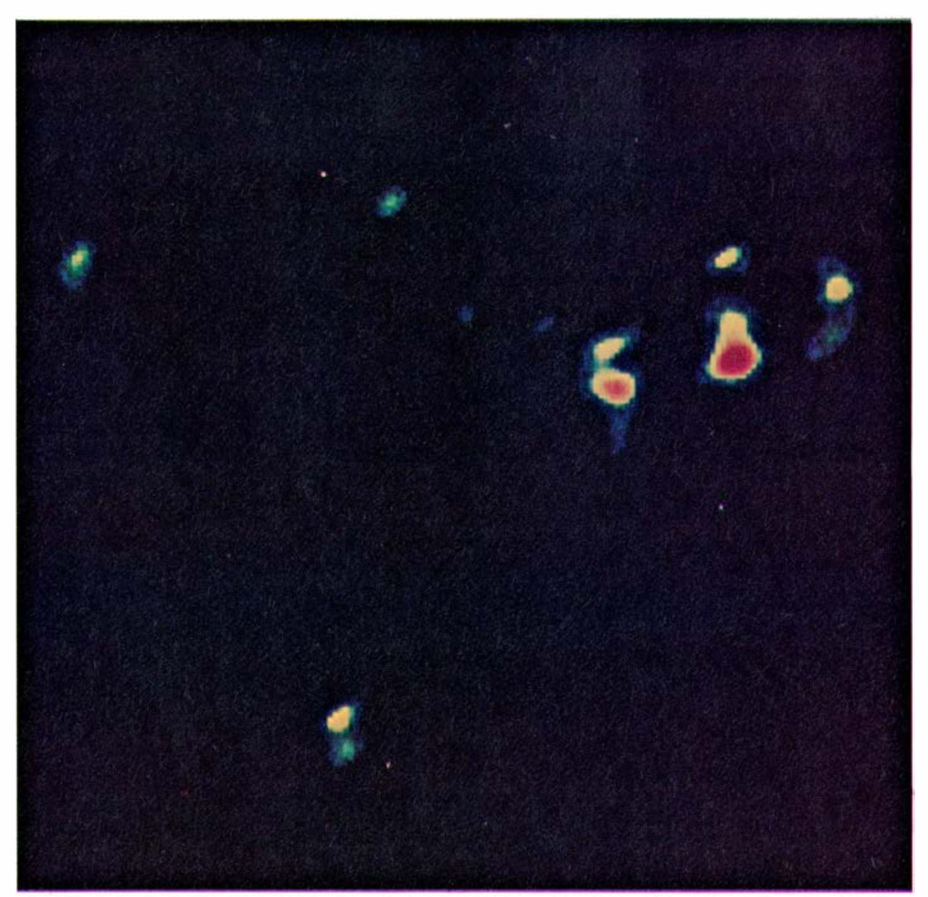
nados. De una exploración reciente, realizada por Michel Fich, de la Universidad de California en Berkeley, Antony A. Stark, de los Laboratorios Bell, y el autor, se infiere que aproximadamente el 80 por ciento de todas las regiones H II visibles en la galaxia se hallan asociadas a nubes moleculares. Las estrellas *O* que ionizan las regiones H II tienen vidas medias breves, hasta el punto de que no pueden haberse trasladado muy lejos de su lugar de nacimiento. (Incluso a una velocidad de 10 kilómetros por segundo respecto al gas de un complejo gigante de nubes moleculares, la estrella en cuestión necesitaría la totalidad de su vida de tres millones de años para viajar 30 parsecs, distancia que bien podría dejarla todavía en el interior del complejo.) Parece, pues, razonable deducir que las estrellas *O* de gran masa y corta vida se forman en el interior de los complejos, y que la radiación ultravioleta que emiten ioniza el gas que las rodea, convirtiéndolo en una región H II.

La radiación de las estrellas *O* no sólo ioniza el gas de un complejo gigante de nubes moleculares; también lo empuja. La realidad es que el gas puede salir expulsado de la superficie del complejo a una velocidad de 10 o 12 kilómetros por segundo. A tal velocidad, el gas escapa de la influencia gravitatoria de la nube. Lo que explica que las estrellas nacidas en un complejo gigante de nubes moleculares contribuyan a su destrucción. De hecho, la velocidad a la que las estrellas *O* ionizan y empujan el gas en un complejo es lo suficientemente alta para que, si las estrellas se formasen continuamente en su interior, el complejo se desintegraría en contadas decenas de millones de años.

Hay razones para creer que existe una incesante formación de estrellas. Cuando una región H II y un complejo gigante de nubes moleculares están contiguos, la presión de la radiación que sale de la región H II y la presión del viento de partículas procedente de las estrellas *O*, dentro de ella, se combinan para impulsar una onda de choque complejo adentro. La onda de choque es un frente a lo largo del cual la temperatura, presión y densidad del gas varían bruscamente. ¿Cómo afecta al complejo? Comprime el gas molecular. Bajo circunstancias normales, la presión que reina en el interior de una nube equilibra aproximadamente la autogravitación de la nube, que tendería a contraer la nube hasta colapsarla si su efecto no estuviera compensado. La pregunta sobre la causa que produce la presión, una de las cuestiones más importantes, permanece sin respuesta hasta la fecha. Se sabe que no basta la presión producida por el calor dominante en la nube, a una temperatura de 10 grados Kelvin. Muchos investigadores sospechan de la incidencia de los campos magnéticos en el gas. En cualquier caso, parece posible que cuando el gas se comprima por efecto de una onda de choque, la autogravitación de una bolsa de gas en el complejo aumente hasta el punto de que la bolsa se vea incapaz de resistir el colapso. La contracción resultante podría continuar hasta que la bolsa se convirtiera en estrella.

Hace varios años, Elmegreen y Lada desarrollaron un modelo teórico de los efectos que produciría una onda de choque en un complejo gigante de nubes moleculares. Analizaron la interacción de una región H II con una capa uniforme de gas molecular y sugirieron que la onda de choque causada por una generación de estrellas podría iniciar la formación de una nueva generación. Más recientemente, Richard I. Klein, de la Universidad de California en Berkeley, y Maxwell T. Sandford y Rodney Whittaker, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, han desarrollado un modelo para la interacción entre una región H II y una nube de gas no uniforme, lo que constituía una representación más adecuada de la estructura de un complejo gigante de nubes moleculares. Llegaron a la conclusión de que, en la formación de estrellas, intervenían de un modo destacado procesos bastante violentos: una bolsa de gas podía verse impulsada hacia su propio interior ("implosionada" si se nos permitiera el neologismo) por la llegada de una onda de choque.

En principio, el desencadenamiento de la formación de nuevas generaciones de estrellas por las generaciones antiguas en un complejo gigante de nubes moleculares podría continuar hasta que todo el gas molecular encerrado en el complejo se hubiera transformado en estrellas o dispersado en el medio inte-



REGIONES H II ULTRACOMPACTAS, invisibles en longitudes de onda ópticas, que se encuentran en el interior de un complejo gigante de nubes moleculares en la constelación del Aguila. Fueron descubiertas por William J. Welch y John W. Dreher, de la Universidad de California en Berkeley, con los radiotelescopios llamados la Gran Distribución, situados en Nuevo México. Cada mancha brillante señala una de tales regiones; se cree que su radioemisión (*presentada aquí en falso color*) resulta de la radiación ultravioleta de una única estrella joven y de gran masa. Al parecer, la radiación ultravioleta ha ionizado átomos de hidrógeno, que a su vez emiten radioondas conforme se van decelerando. A una distancia del sistema solar de unos 15.000 parsecs, la región H II no puede tener un diámetro superior a 0,04 parsecs; bajo esa hipótesis, las estrellas invisibles de su interior han comenzado a ionizar sus alrededores. Quizá no lleguen a los 1000 años de edad, lo que las convertiría en el más joven de los cúmulos de estrellas de gran masa.

restelar. La presencia de varias generaciones de estrellas *O* en los complejos gigantes de nubes moleculares, tales como los asociados a las regiones H II conocidas por Nebulosa de Orión y Nebulosa de Roseta, sugiere que tal es el caso. También hay indicaciones observacionales de que las estrellas se forman espontáneamente en el seno de un complejo gigante de nubes moleculares. En este sentido, Mark T. Stier, Daniel T. Jaffee y Giovanni G. Fazio, del Centro de Astrofísica, han mostrado que están surgiendo estrellas de gran masa en todo el complejo gigante de nubes moleculares asociado a la Nebulosa de Omega, y no sólo en la parte del complejo que podría haber sido afectada por la onda de choque procedente de la nebulosa. Se cree, además, que ciertas clases de estrellas jóvenes de masa pequeña, como las T de Tauro, nacen en zonas de los complejos moleculares no sometidos a ningún mecanismo externo de desencadenamiento. Seguimos sin saber cuál sea la proporción de estrellas cuyo nacimiento ha sido provocado y cuál la tasa de las que se forman espontáneamente, pero hay que tener en cuenta que la creación de estrellas es uno de los fenómenos peor conocidos entre los que estudia la astronomía.

Vida de las nubes

Una cosa parece clara: todos los complejos gigantes de nubes moleculares registrados en la vecindad del Sol (es decir, dentro de unos 2000 parsecs) revelan indicios de que allí se han formado, recientemente, estrellas jóvenes. Unas veces los complejos están asociados a estrellas visibles cuya juventud atestigua la observación; otras se detectan estrellas todavía en fase de gestación en el interior de los complejos merced a su radiación infrarroja. Parece verosímil, pues, que los complejos comiencen a alumbrar estrellas de gran masa al poco de la formación de las propias nubes. Parece también probable que, si los complejos alcanzaran edades de más de 100 millones de años, la turbulencia y la viscosidad de su interior acabarían por darles una conformación redondeada, con un núcleo denso y definido. Pero ocurre que los complejos son irregulares, apedazados, sin una condensación central discernible. La opinión de que los complejos gigantes de nubes moleculares que vemos hoy tienen una edad inferior a los 30 millones de años no goza de una aceptación general por parte de todos los investigadores. Sin embargo, dominan las pruebas a favor de la hipótesis según la cual los complejos son objetos bastante jóvenes a escala galáctica; en concreto, no más antiguos que la centésima parte de la edad del Sol y de la Tierra.

Por otro lado, si las nubes son jóvenes, ha de haber algún mecanismo que las forme continuamente en la galaxia. Se han propuesto varios de ellos. Se ha sugerido que las nubes moleculares se sueldan cuando chocan entre sí. (Su velocidad media de choque es mayor que la velocidad del sonido en las nubes; de ahí que la colisión genere una onda de choque, que recuerda mucho al estampido sónico, onda que disipa la energía del choque. No cabe esperar, pues, que las nubes que chocan se separen entre sí.) A lo largo de un período de tiempo suficiente, emergen nubes gigantes a partir de los choques de muchas nubes menores. La única objeción sería que el proceso resulta, probablemente, demasiado lento: la mayoría de los cálculos sugieren que sólo tendría explicación en el caso de que las nubes alcanzasen edades superiores a varios cientos de millones de años.

Otro mecanismo, propuesto por Frank H. Shu y sus colaboradores en Berkeley, postula que la formación de los complejos gigantes de nubes moleculares está condicionada por el campo magnético presente en el medio interestelar. El campo actúa sobre las partículas cargadas (iones) en el medio, pero los iones transmiten los efectos del campo hasta las partículas descargadas, principalmente mediante choques con ellas. De esta manera, las inestabilidades ocurridas en el campo pueden determinar que el medio fluya de suerte que, como Shu propone, se formen complejos. Un tercer mecanismo, avanzado por Elmegreen, mantiene que la autogravitación del gas barrido por los brazos espirales de la galaxia se basta por sí misma para hacer que el gas se reúna en porciones de tamaño y masa típicos de un complejo gigante de nubes moleculares. Los astrónomos seguirán proponiendo nuevos mecanismos, pero la solución del problema de cómo se forman los complejos no parece estar aún a la vista.

Historias de las nubes

De lo que se sabe sobre los complejos cabe presumir que atraviesan un ciclo característico de nacimiento, madurez y muerte. Aunque varios pormenores se mueven en el terreno de la hipótesis, el esquema que a continuación describiré parece sólido.

A medida que el gas de la galaxia se mueve en órbita en torno al centro de la misma, encuentra periódicamente regiones donde la densidad del medio interestelar es más elevada. Estas regiones se deben a ondas de densidad, que se mueven en el seno del disco galáctico de manera muy parecida a como las ondas sonoras lo hacen en un medio aéreo. Pero el origen de las ondas de densidad es gravitatorio. Las ondas de densidad constituyen la respuesta de la materia de una galaxia a una perturbación gravitatoria, cuyo origen puede estar en una distribución de estrellas en forma de barra en el núcleo de la galaxia o en una galaxia compañera, o en ambas causas. (Nuestra propia galaxia tiene dos compañeras de gran masa, las dos Nubes de Magallanes, Grande y Pequeña. Algunos investigadores han sugerido, además, que las estrellas del núcleo de nuestra galaxia presentan una distribución en forma de barra.) Las ondas de densidad pueden producir la estructura de brazos espirales de la galaxia. En las regiones donde la densidad aumenta (que probablemente corresponden a brazos espirales enteros o segmentos de ellos) el gas de la galaxia se ha recogido, como sea, en grandes agregaciones. Estas constituyen los complejos gigantes de nubes moleculares. Si el gas es inicialmente molecular, las nubes pequeñas se reúnen para formar los complejos gigantes. Si el gas es inicialmente atómico, su compresión causa la formación de moléculas.

Una vez constituidos los complejos, se crean estrellas de pequeña masa en su interior. En la mayoría o en la totalidad de los complejos, hay zonas con una bolsa de gas dotada de masa suficiente para dar lugar a una o más estrellas *O*. Al principio, esas estrellas son invisibles en los telescopios ópticos. Pueden, no obstante, detectarse en el infrarrojo. Pronto empiezan a ionizar el gas que las rodea. El resultado es una región H II compacta. Aun entonces, las estrellas son ópticamente invisibles, pero los radiotelescopios y telescopios de infrarrojo detectan la región H II.

La región H II se desarrolla hasta que su gas ionizado alcanza la superficie del complejo gigante de nubes moleculares. Se pueden ver entonces las estrellas *O* en medio de la región H II que crearon. La radiación y el viento de partículas procedentes de esa región disipan parte del complejo, descubriendo así algunas de las estrellas de pequeña masa que se han estado formando. Mientras tanto, la radiación y el viento de partículas comprimen parte del gas molecular restante, desencadenando

posiblemente la formación de una nueva generación de estrellas de gran masa. Las nuevas estrellas continúan los procesos de ionización y compresión hasta que la mayor parte del gas molecular del complejo se consume o es arrastrado. Esto se produce en aproximadamente 30 millones de años. Por otro lado, las estrellas *O* se forman espontáneamente en el complejo (suelen hacerlo en racimos) hasta que se consume éste.

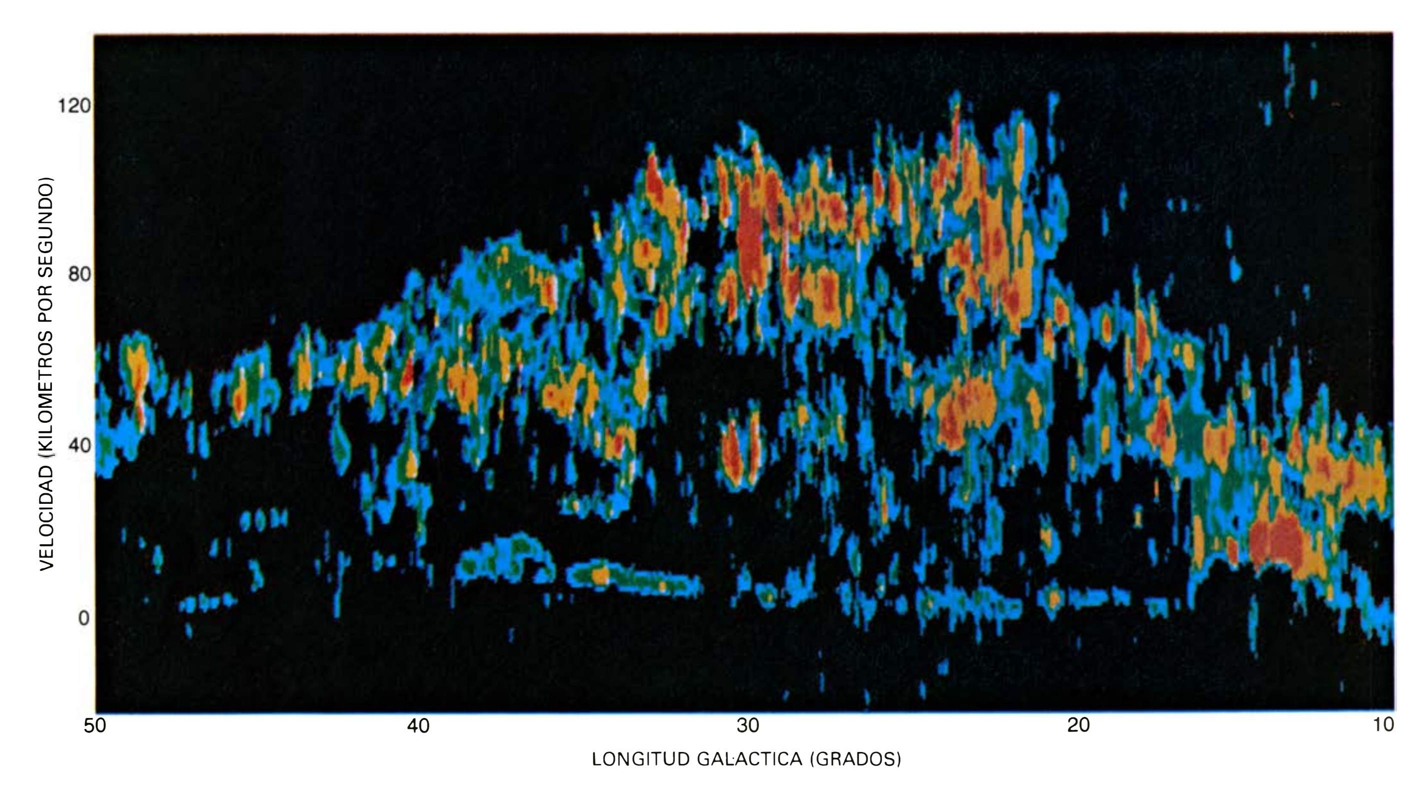
Mientras se va consumiendo el complejo, podrían acelerarse, hacia el medio interestelar, fragmentos bastante pequeños de gas, más o menos intactos. ¿Cómo? El proceso lo describieron J. H. Oort, del Observatorio de Leiden, y Lyman Spitzer, Jr., de la Universidad de Princeton. De acuerdo con su exposición, la radiación estelar ioniza una cara de un fragmento; después, la emisión de radiación por los propios iones propulsa al fragmento hacia el exterior del complejo. Tal vez, el proceso origina al menos algunas de las pequeñas nubes de gas molecular descritas por Bart J. Bok, de la Universidad de Arizona, y conocidas hoy como glóbulos de Bok. En cualquier caso, los protones y electrones expulsados desde el complejo acaban por recombinarse para formar átomos de hidrógeno neutro. El gas compuesto por estos átomos se convierte en parte del medio interestelar. De nuevo reemprenderá una órbita alrededor del centro de la galaxia y continuará siguiendo esa órbita hasta que de nuevo encuentre un brazo espiral. El proceso que forma los complejos gigantes de nubes moleculares se pondrá en marcha nuevamente.

Distribución de los complejos

Las brillantes estrellas que se forman en los complejos gigantes de nubes moleculares definen con nitidez la estructura espiral, en gran escala, de muchas galaxias distintas de la nuestra. Es por tanto natural suponer que los complejos de nuestra galaxia revelen una configuración de brazos espirales. Varios grupos de investigadores han tratado de encontrarla, pero los resultados obtenidos hasta ahora pecan de ambigüedad. Por un lado, parte de las exploraciones son incompletas. Además, se hace difícil cartografiar brazos espirales en las zonas internas de la galaxia, porque las radioobservaciones revelan sólo la velocidad del monóxido de carbono interestelar en función de su dirección en el cielo. La velocidad, que se determina por la rotación del gas alrededor del centro de la galaxia, da de manera inequívoca la distancia de una bolsa de gas al centro. Sin embargo, deja sin resolver la duda entre las dos distancias posibles desde el sistema solar.

De mi propio trabajo, realizado en colaboración con Shrinivas Kulkarni y Carl Heiles, de Berkeley, se desprende que los complejos gigantes de nubes moleculares en las regiones exteriores de la galaxia se concentran, en realidad, en brazos espirales regulares. En cuanto a las partes internas, las exploraciones de monóxido de carbono interestelar llevadas a cabo hasta la fecha muestran una concentración de nubes moleculares en el centro de la galaxia. Fuera de éste, la máxima concentración de nubes se ubica a distancias radiales entre 4000 y 8000 parsecs. Más allá, la concentración de gas molecular disminuye hacia el borde del disco de la galaxia, que se encuentra a 20.000 parsecs del centro. (El Sol se mueve en órbita alrededor del centro de la galaxia a unos 10.000 parsecs de distancia.)

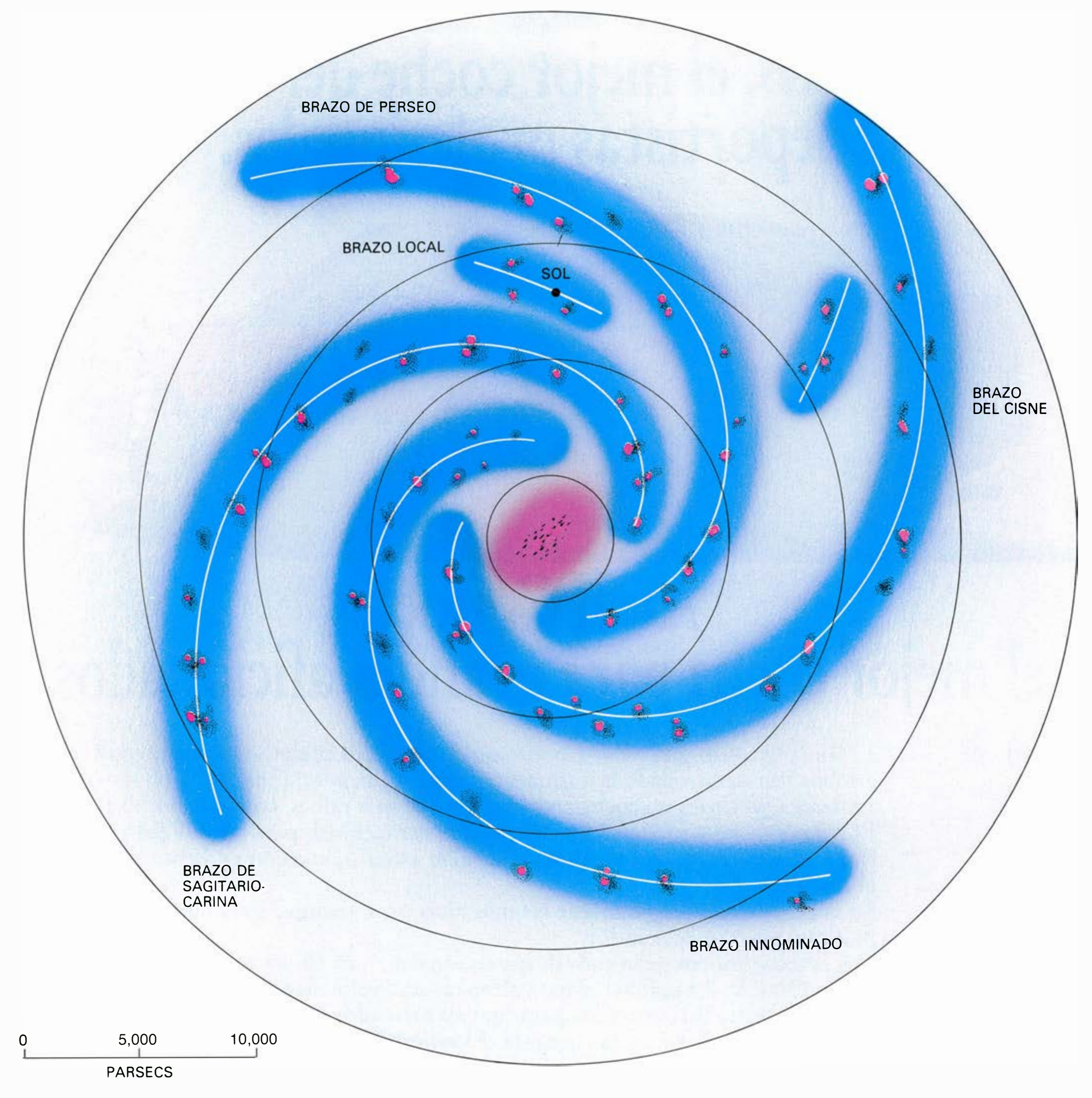
El estudio de los complejos gigantes de nubes moleculares y su relación con la estructura de la galaxia está todavía en su infancia. Apenas comienzan los



EXPLORACION DEL MONOXIDO DE CARBONO en la parte interna de la galaxia. Sugiere dicha inspección que gran parte del gas molecular allí existente está distribuido en forma de complejos de nubes gigantes, como las que existen en la vecindad del sistema solar. En el mapa, el eje horizontal representa la longitud galáctica desde 10 a 50 grados. (Cero grados indica la dirección hacia el centro de la galaxia.) El eje vertical representa la velocidad del monóxido de carbono respecto a la velocidad media de las estrellas próximas al Sol. Una velocidad dada corresponde a una distancia particular desde el centro. Por ejemplo, la gran concentración de gas (*manchas rojas y amarillas*) a velocidades superiores a 70 kilómetros por segundo y longitudes de 22 a 34 grados representa nubes moleculares situadas a unos 4000 a 7000 parsecs desde el centro. La exploración fue realizada por Philip M. Solomon, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, y David B. Sanders y Nicholas Z. Scoville, de la Universidad de Massachusetts en Amherst.

astrónomos a darse cuenta de que los complejos pueden intervenir de una manera destacada en la distribución de estrellas de la galaxia; y no sólo porque en ellos nacen estrellas, sino también porque ejercen fuerzas gravitatorias y de marea sobre las estrellas y cúmulos de estrellas situados a su alrededor. Hace unos 25 años, Spitzer y Martin Schwarzschild, de Princeton, defendieron que la distribución de estrellas en la dirección perpendicular al disco de la galaxia podría deberse a la interacción gravitatoria entre las estrellas y las nubes gaseosas de gran masa. Hace tres años, Stark y el autor demostraron que los complejos gigantes de nubes moleculares en la galaxia tenían masa suficiente y eran lo bastante grandes para explicar tal distribución.

Las fuerzas de marea ejercidas por los complejos gigantes de nubes moleculares podrían ser responsables de la deformación y ulterior disipación de cúmulos de estrellas débilmente ligadas. Además, muchos astrónomos sospechan que los rayos gamma generados dentro de la galaxia provienen del choque de partículas de alta energía con la materia en las nubes moleculares gigantes. Conforme los científicos van orientando su atención a las nubes moleculares gigantes, descubren que las nubes afectan a la galaxia de maneras insospechadas. El hallazgo de cualquier nuevo componente importante del universo lleva consigo no sólo la emoción del descubrimiento, sino también un nuevo haz de preguntas.



CONFIGURACION PROPUESTA de los brazos espirales de las galaxias. Muestra que los complejos de nubes moleculares gigantes (*negro*) y las regiones H II (*púrpura*) están confinadas, a grandes rasgos, a un grupo de cuatro brazos. (El sistema solar está situado en lo que se diría un brazo incompleto o el espolón de un brazo.) Se ve, sin embargo, que la concentración más densa de gas molecular se sitúa en el rango de unos 350 parsecs del centro de la galaxia, es decir, una trigésima parte de la distancia del centro al Sol. Las estrellas jóvenes y brillantes (*azul*) siguen la configuración de los brazos; las más antiguas y débiles (*rojo*) ofrecen una distribución más regular, salvo en el centro de la galaxia, donde hay una distribución de estrellas en forma de barra. El dibujo de los brazos se basa en un estudio del hidrógeno atómico interestelar en la galaxia realizado por el autor, S. Kulkarni y C. Heiles.

El calamar gigante

Este cefalópodo de aguas profundas se avista con tanta rareza que parece un animal mitológico. Varios ejemplares se han estudiado ya, sin embargo, lo que nos permite esbozar su anatomía y ecología

Clyde F. E. Roper y Kenneth J. Boss

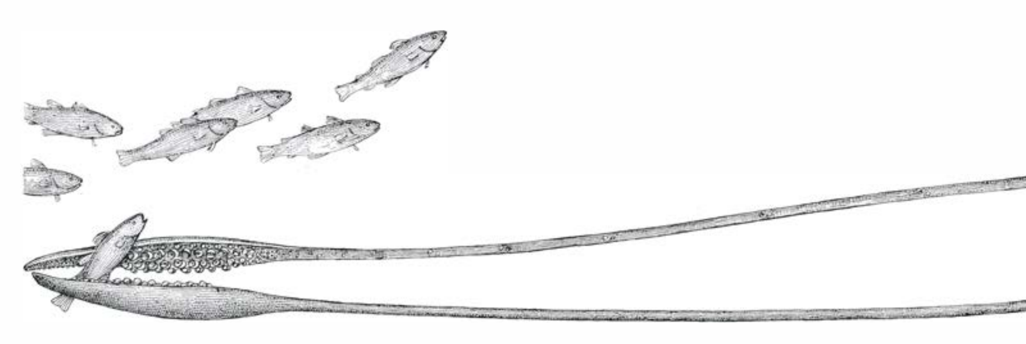
En *Moby Dick*, Herman Melville nos describe un ser marino de "una enorme masa carnosa, estadios de longitud..., largos brazos que irradian de su centro y que se retuercen y enroscan como un nido de anacondas". Aludía, sin duda, al calamar gigante; su relato refleja la parca información de que por aquel tiempo se disponía sobre el animal. De hecho, hasta que la tripulación de un buque de guerra francés avistó uno en 1861 y consiguió izar parte de él, pertenecía más al reino del mito que al real. Incluso hoy, cuando se ha informado de un número considerable de ejemplares, el calamar gigante (que pesa hasta 450 kilogramos y tiene una longitud total de unos 18 metros, con los tentáculos extendidos) sigue rodeado de un halo de misterio. Nunca duró mucho tiempo un ejemplar vivo en ningún centro de investigación o acuario. Casi todo lo que de él conocemos proviene de varamientos, en los que el animal estaba ya muerto o agonizante, de ejemplares capturados que murieron pronto y de individuos extraídos del estómago de cetáceos odontocetos (que comen peces o calamares). A partir de esa información puede establecerse la morfología de un calamar gigante adulto y esbozarse su anatomía interna. Sobre otros puntos, así su hábitat y método de reproducción, sólo caben conjeturas probables basadas en lo que se sabe de calamares oceánicos afines.

Los teutólogos, que así se llaman los biólogos que estudian los cefalópodos (grupo de animales marinos que incluye los calamares, las jibias y los pulpos), han colocado al calamar gigante en un género propio, *Architeuthis*, de la familia Arquitéutidos. Se han descrito 19 "especies" nominales, algunas fundándose sólo en partes fragmentarias. Hasta hace poco la tendencia era clasificar casi cada nuevo hallazgo como una especie nueva. Aunque los teutólogos no se ponen de acuerdo, se ha sugerido que las 19 especies nominales podrían quedar incluidas en sólo tres: *Architeuthis sanctipauli*, en el hemisferio sur, *A. japonica*, en el Pacífico norte, y *A. dux*, en el Atlántico norte. Se ha reunido cierta cantidad de pruebas, basadas principalmente en el tamaño relativo de la cabeza y el perfil de la aleta caudal, que indican que en el Atlántico viven hasta cinco especies, otras dos en el Pacífico norte y varias más en el Pacífico sur.

En 1980 varó en Plum Island, Massachusetts, un ejemplar de tamaño medio (unos 10 metros de longitud total). El animal fue conservado y se exhibió durante varios meses en el New England Aquarium, en Boston; se halla hoy en el Museo Nacional de Historia Natural, de la Institución Smithsoniana de Washington, donde se está estudiando en detalle. Investigación que avala buena parte de los datos de nuestra exposición. Seguimos en ella la terminología clásica para evitar ambigüedades acerca de las posiciones anatómicas. Así, el término dorsal se referirá al dorso o parte superior, ventral al vientre o parte inferior, caudal para indicar en o cerca de la cola; anterior y posterior; proximal para señalar la cercanía a un punto de referencia y distal para el alejamiento del mismo. La posición normal de natación del calamar gigante es horizontal, de manera que el lado dorsal del animal se encuentra arriba y, su lado ventral, abajo.

Su cabeza, cilíndrica, alcanza cerca de un metro de longitud; se halla conectada al cuerpo propiamente dicho mediante un "cuello" que presenta un collar o vaina circular con un cartílago dorsal de fijación. El aparato bucal, rodeado de una corona de ocho gruesos brazos musculares y dos tentáculos, largos y delgados pero musculosos, se extiende desde el extremo anterior de la cabeza. (Cefalópodos significa pies en la cabeza.)

Aunque los brazos son proporcionalmente largos en los individuos jóvenes, en los adultos son, en comparación, mucho más cortos que los tentáculos. Un brazo puede alcanzar un diámetro



CALAMAR GIGANTE ADULTO, que puede alcanzar los 18 metros de longitud y pesar hasta 450 kilogramos. Esta recreación se basa en numerosos ejemplares, o fragmentos de los mismos, que se han dibujado, fotografiado o conservado durante el último siglo. El calamar del dibujo captura peces, extendien-

de 50 centímetros en la base y una longitud de tres metros. Cada brazo porta en su superficie interna membranas protectoras bajas, débiles y a veces festoneadas, que bordean dos hileras de ventosas. Las ventosas van disminuyendo de tamaño en sentido distal, hasta que en la punta de los brazos se han convertido ya en minúsculas protuberancias.

Los dos brazos ventrales de los machos están hectocotilizados, es decir, especializados para facilitar la fecundación de los huevos de la hembra. Con ellos el macho transfiere sus espermatóforos a la hembra durante el apareamiento. Estos brazos difieren de una especie a otra en su longitud y diámetro y en la importancia de su modificación para la función copuladora. Distalmente poseen, como continuación de las dos hileras de ventosas, dos filas de almohadillas rectangulares separadas por una profunda acanaladura.

Los dos tentáculos, con los que el calamar captura a su presa con un movimiento bastante parecido a la embestida y cierre de un par de pinzas, tienen unos 25 centímetros de diámetro en la base y pueden alcanzar una longitud de más de 10 metros. El pedúnculo de un tentáculo es desnudo a lo largo de la base; conforme nos alejamos de ella aparecen, alternándose, pequeñas ventosas y protuberancias adhesivas. Tanto las ventosas como las protuberancias aumentan en tamaño y frecuencia hacia el extremo distal, ligeramente ensanchado, del tentáculo: la maza. La mano o palma de la maza tiene cuatro hileras de ventosas finamente dentadas. Las medias, que son mayores y dispuestas en dos filas, tienen dos veces y media el diámetro de las menores, situadas en las hileras marginales. El diámetro de una ventosa tentacular puede alcanzar los 5,2 centímetros. El extremo distal de la maza, el denominado dáctilo (dedo), es ahusado, delgado y recubierto por cientos de pequeñas ventosas.

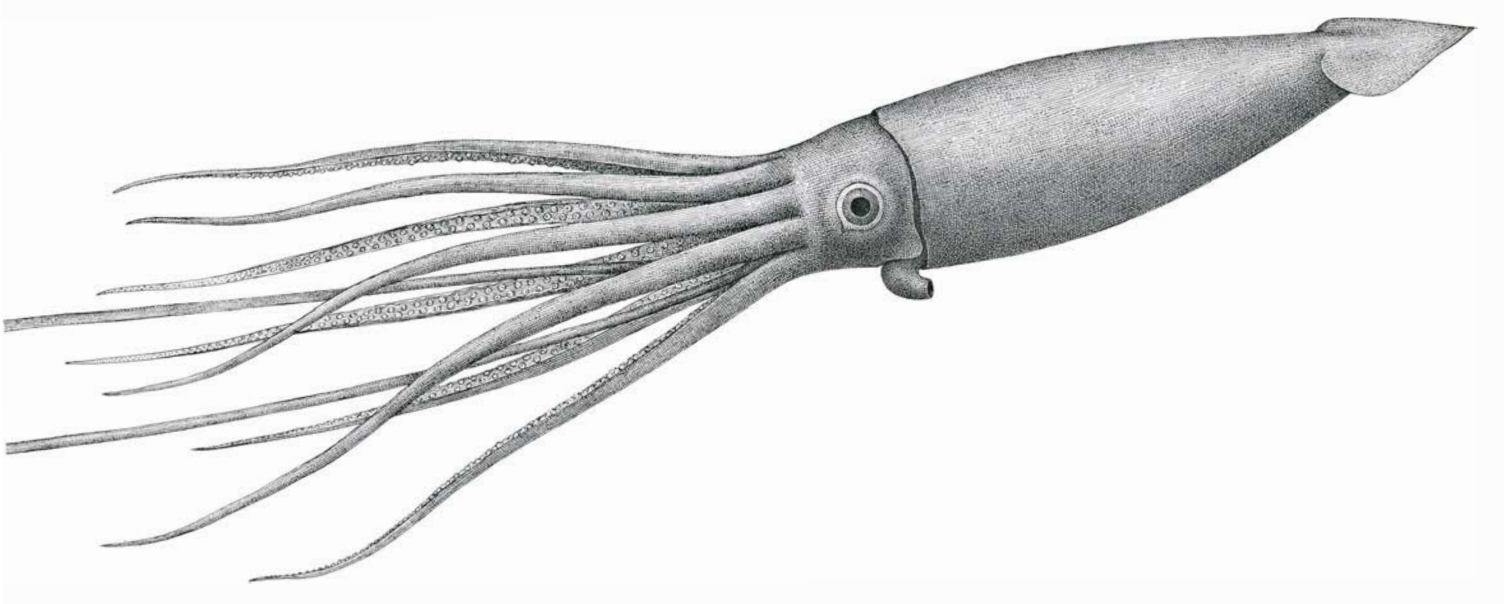
Todas las ventosas de un calamar gigante tienen la forma de una copa de succión. Cada ventosa está situada sobre un pedicelo muscular, un corto pedúnculo que el animal puede mover. El perímetro de una ventosa está revestido interiormente por un anillo de quitina (el material duro que forma el revestimiento externo de muchos crustáceos e insectos), fuertemente dentado, que se adhiere a la superficie de la piel cuando se aplica la ventosa. No parece haber ganchos especializados en lugar de ventosas, como ocurre en algunos otros calamares oceánicos.

En la piel de cachalotes, e incluso en su estómago, se han encontrado huellas de cicatrices producidas por ventosas de calamares. El diámetro de estas cicatrices se ha exagerado mucho; se ha llegado a hablar hasta de 20 centímetros. Estos datos han llevado, por extrapolación, a una estima equivocada de la longitud máxima de los calamares gigantes. Las pruebas más fiables sugieren que el diámetro medio de las ventosas del brazo ronda los 2,5 centímetros, y que el diámetro máximo es de 5,2 centímetros, tamaño que a veces se encuentra en una maza tentacular.

La forma del manto, o cuerpo, recuerda bastante la de un cono estrecho que se ahúsa hasta una cola bruscamente afilada. En los adultos existe un saliente corto, fuerte y en forma de cola, que se extiende más allá de las aletas; los juveniles carecen de él. Las aletas son flexibles pero no muy musculosas, lo que sugiere que funcionan, en la natación, como paletas estabilizadoras.

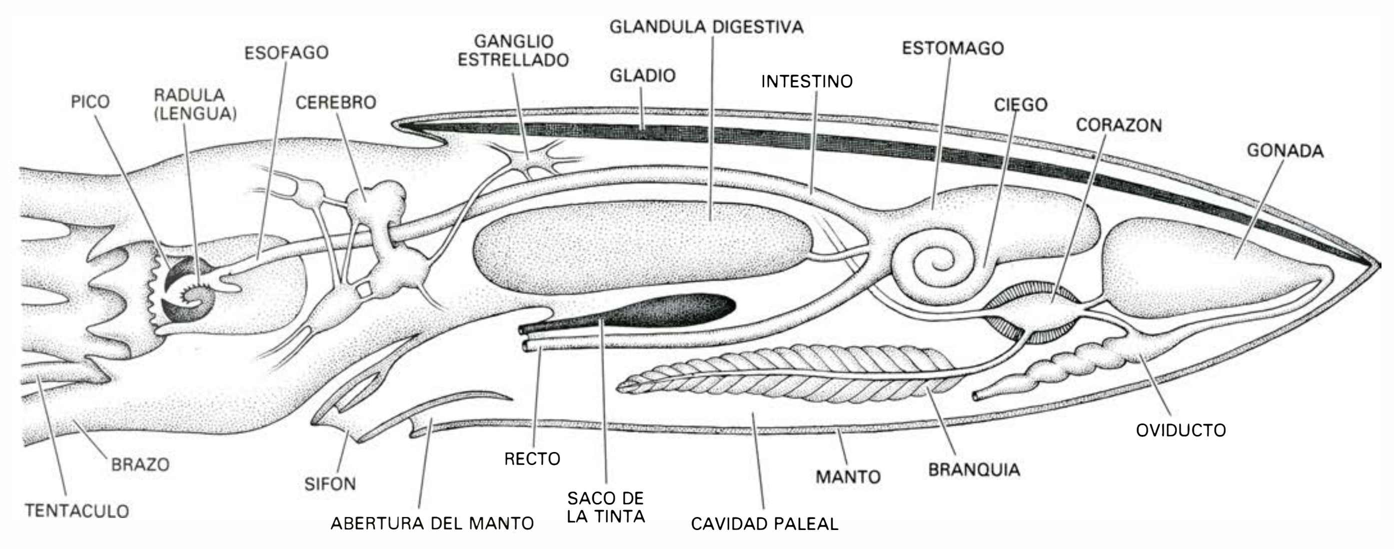
Como una modificación del pie de un molusco típico, por detrás de la cabeza y en el extremo anterior del manto se yergue ventralmente un sifón grande y musculoso. Lo usa para tomar impulso y expulsar agua de su cavidad paleal. El sifón es muy móvil, de modo que le permite abalanzarse hacia delante, atrás, arriba, abajo o a los lados. En el interior del sifón hay una válvula en forma de halda que evita el reflujo de agua entre chorro y chorro. Ventralmente, en la base del sifón y a cada lado, hay un surco de cartílago que se traba con sus crestas cartilaginosas correspondientes situadas sobre la superficie interior del manto, cuando el calamar está expulsando agua. Este mecanismo de cierre del sifón impide que el agua escape alrededor del cuello, y la fuerza a salir a través del sifón.

Posee asimismo una estructura interna de soporte, translúcida, que se denomina indistintamente gladio o pluma. Se trata del resto de una arcaica concha calcárea interna que todavía se encuentra en cefalópodos más primitivos, como la jibia. El gladio se halla instalado en un saco de la musculatura del manto, y se extiende hacia atrás desde el borde anterior del manto hasta la extremidad posterior en forma de cola. Funciona como una vara esquelética para la inserción de los músculos y como un travesaño de soporte del cuerpo alargado.

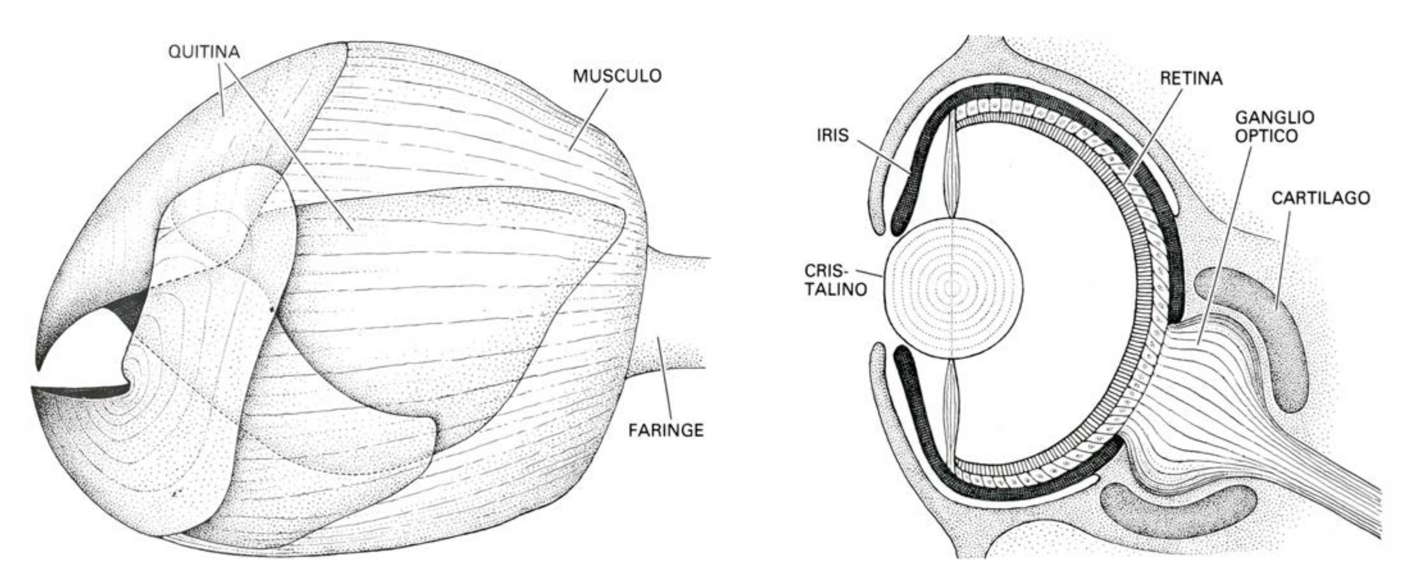


do sus largos tentáculos, mientras ataca, propulsándose hacia delante al expulsar agua a través del sifón, dirigido hacia atrás, que se aprecia bajo el ojo. Girando adecuadamente el sifón, el calamar puede desplazarse en cualquier dirección; aun así, parece ser un nadador más bien mediocre. En la clase Cefalópodos, el calamar gigante se clasifica en el género *Architeuthis*; el número de especies de este género todavía no se ha establecido definitivamente.

El tegumento pluriestratificado que envuelve el cuerpo, la cabeza y los brazos es, dorsalmente, de color rojo oscuro purpúreo a castaño y, ligeramente más claro, ventralmente. El color de las superficies dorsal y ventral de los brazos es menos intenso que el de las laterales. La coloración no sólo proviene de una pigmentación de fondo, sino también de una capa de cromatóforos, células pigmentarias que pueden cambiar la coloración del tegumento al expandirse o contraerse. Probablemente le sirvan los cromatóforos para modificar el color del tegumento según las necesidades de comportamiento o los cambios en la cantidad de luz del agua. La superficie interna del manto y algunas de las vísceras tienen asimismo una pigmentación rojiza oscura, característica insólita en los calamares oceánicos.



ANATOMIA INTERNA de un calamar gigante hembra, indicada sobre la base de los conocimientos actuales. El gladio, que también se llama pluma, es una estructura bastante rígida que sirve de vara sustentadora para el largo cuerpo del animal y también como punto de inserción de los músculos.



BOCA Y OJO del calamar gigante; se cuentan entre las características más notables del animal. El poderoso pico de dos mandíbulas está compuesto por quitina, el duro material que forma el recubrimiento externo de muchos crustáceos e insectos. Mediante su pico, el calamar fragmenta la presa en trozos deglutibles. Los ojos del calamar gigante son los mayores del mundo animal, alcanzando cada uno de ellos aproximadamente 25 centímetros de diámetro.



EXTREMO EN MAZA DE UN TENTACULO del calamar gigante; se distingue por la presencia de una mano, o palma, en la que el tentáculo se ensancha ligeramente. La mano tiene cuatro hileras de ventosas finamente dentadas; poseen las mayores unos cinco centímetros de diámetro y las más pequeñas alrededor de dos. Todas las ventosas pueden moverse. Sobre el extremo del tentáculo, a la izquierda, puede verse una ventosa y su anillo quitinoso.

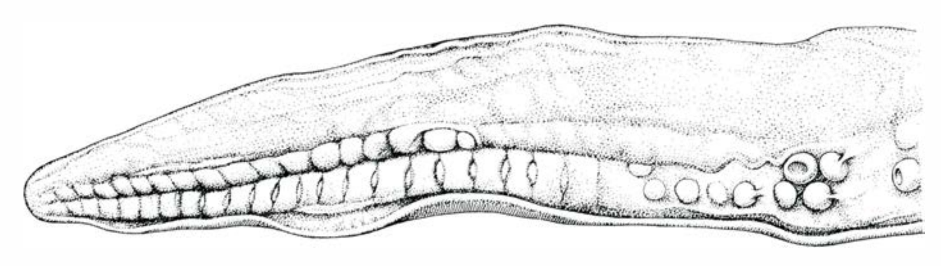
En *Architeuthis* no se conocen fotóforos, u órganos bioluminiscentes.

Los ojos son enormes, mayores que los faros de un automóvil. Con un diámetro que se acerca a los 25 centímetros, son los mayores ojos del reino animal. Se disponen lateralmente sobre la cabeza y son de contorno circular. Tienen un cristalino ajustable y un iris oscuro, pero carecen de córnea.

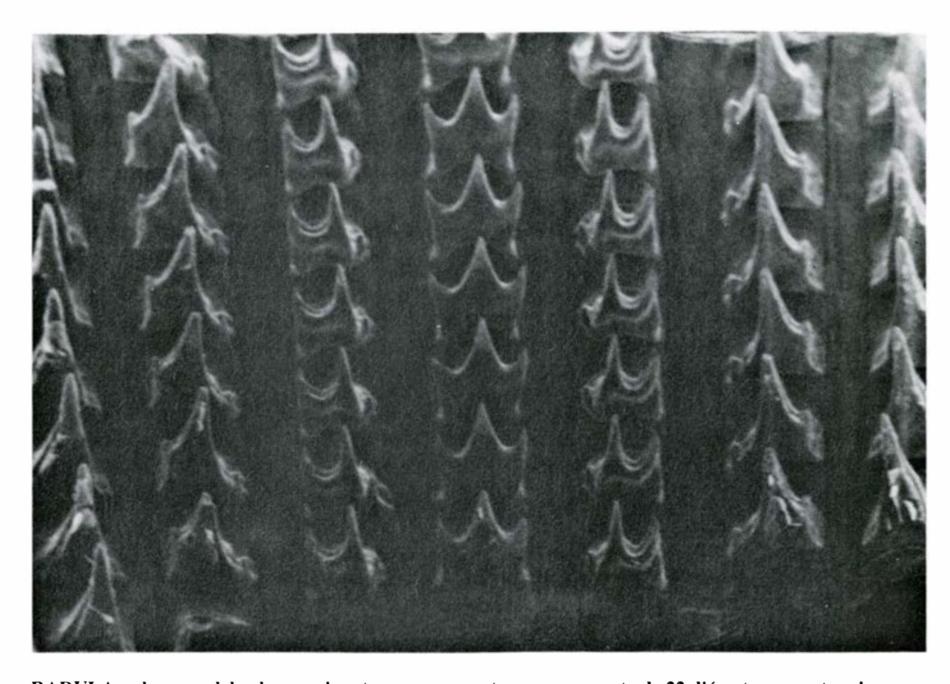
La boca se encuentra en el centro de la corona circular de brazos. El animal emplea unas poderosas mandíbulas quitinosas, embutidas en una masa muscular y capaces de rotación y de evaginación, para morder a las presas y fragmentarlas en pedazos adecuados para su deglución. Estos picos de loro, que pueden tener más de 15 centímetros de longitud, constan de una mandíbula superior y otra inferior. La fuerte mandíbula superior presenta un rostro punzante y en ángulo agudo que forma un borde cortante con la mandíbula inferior, que característicamente posee un rostro corto y romo, así como expansiones alares redondeadas. Si se examinan cuidadosamente, las mandíbulas aisladas de unas especies de calamares pueden distinguirse de las de otras. De ahí que puedan identificarse los contenidos digestivos, de otro modo irreconocibles, de los estómagos de los cetáceos y las inclusiones en ámbar gris, la sustancia cérea que fabrica el cachalote para desembarazarse de los picos indigeribles de los calamares.

La rádula, o lengua raspadora, es un carácter típico de los moluscos; por lo general, está compuesta por una larga banda cuticular que posee filas transversas de dientes quitinizados con cúspides de formas variadas. En *Architeuthis*, la rádula es pequeña para un animal de proporciones tan enormes. Sin embargo, resulta impresionante si se la compara con las rádulas de otros moluscos, pues tiene unos 100 milímetros de longitud y algo más de 10 milímetros de anchura. Cada fila posee un diente central tricúspide y tres dientes más pequeños a cada lado. El alimento, desmenuzado en fragmentos por las mandíbulas, es empujado a la cavidad bucal por el movimiento de engullición de la rádula. Además, numerosas y minúsculas denticulaciones dirigidas hacia atrás (los dientes faríngeos), situadas en la cutícula que reviste la faringe, facilitan la deglución y aseguran que el alimento se desplace hacia el interior del canal alimentario.

El canal alimentario se continúa en un esófago muscular que fuerza al alimento, mediante contracciones peristálticas, hacia el interior de un estóma-



BRAZO ESPECIALIZADO del calamar macho; sirve para transferir espermatóforos a la hembra. Dos de los ocho brazos del calamar gigante macho se hallan especializados en este cometido; se les llama brazos hectocotilizados. Se distinguen por las dos filas de almohadillas rectangulares (en vez de ventosas).



RADULA, o lengua, del calamar gigante, que se muestra a un aumento de 22 diámetros en esta micrografía electrónica de barrido. Los dientes se inclinan hacia la parte posterior de la boca y ayudan a desplazar el alimento hasta el interior del esófago. En conjunto, la rádula mide unos 10 centímetros de longitud.



CICATRICES DE VENTOSAS de un calamar gigante, según aparecen sobre la piel de un cachalote, el principal depredador de *Architeuthis*. Abundan las referencias a esas cicatrices, abiertas cuando el calamar intenta escapar de la acometida del cetáceo, a modo de prueba de la existencia de calamares de tamaño monstruoso. Sin embargo, puesto que las cicatrices crecen a medida que se desarrolla el cachalote, son pruebas poco fiables del tamaño del calamar, salvo que se sepa con certeza que son recientes.

go de gruesas paredes y del ciego anexo. Las enormes glándulas salivales, el "hígado" medio único, o glándula digestiva, y el páncreas anterior segregan enzimas digestivos. La asimilación avanza un paso más en el ciego. Los desechos pasan a través del corto intestino y salen al exterior por un recto provisto de haldas que descarga cerca de la abertura interna del sifón. Los desechos son baldeados a través del sifón con el agua que se expele para la propulsión.

El calamar obtiene oxígeno mediante un par de largas branquias, que posee muchas (a veces más de 100) laminillas o lamelas, las estructuras básicas para el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono. Otra característica es el saco de tinta, propio de la mayoría de calamares. En el gigante, este saco es grande y alargado, con un extenso canal que descarga en el recto. Se cree que la tinta negra y mucosa cumple en nuestros animales la misma función que en los demás calamares; cuando es expulsada por el sifón en una reacción de escape mantiene una forma cohesiva que se parece a la del calamar, lo que confunde al depredador mientras la presunta presa sale huyendo.

La hembra produce un número enorme de huevos blancuzcos y relativamente pequeños, pues tienen de 0,5 milímetros a 1,4 milímetros de longitud y de 0,3 a 0,7 milímetros de anchura. Un ejemplar llevaba más de 5000 gramos, lo que equivale quizás a un millón de huevos.

El aparato reproductor de la hembra se compone de un ovario medio único, situado posteriormente en la masa visceral; oviductos pares arrollados, a cuyo través los huevos maduros salen a la cavidad del manto, y grandes glándulas nidamentosas, que fabrican una masa gelatinosa que envuelve los huevos en la cavidad paleal. Se desconocen el lugar y el método de fecundación, pero es presumible que ésta ocurra cuando los huevos maduros abandonan el oviducto. También se desconoce si los huevos flotan en el océano o si se fijan al fondo del mar; parece probable, sin embargo, que floten en grandes masas gelatinosas, porque este método es característico de todos los demás calamares oceánicos conocidos. Las hembras de muchas especies de calamares de aguas someras poseen un receptáculo para los espermatóforos debajo de la boca, pero en las hembras de *Architeuthis* no se encuentra una estructura de este tipo. Tampoco se han hallado espermatóforos implantados en calamares gigantes hembra, aunque tal implantación (en la cavidad paleal o en la abertura del manto, cerca del cuello) sea común en otros calamares oceánicos.

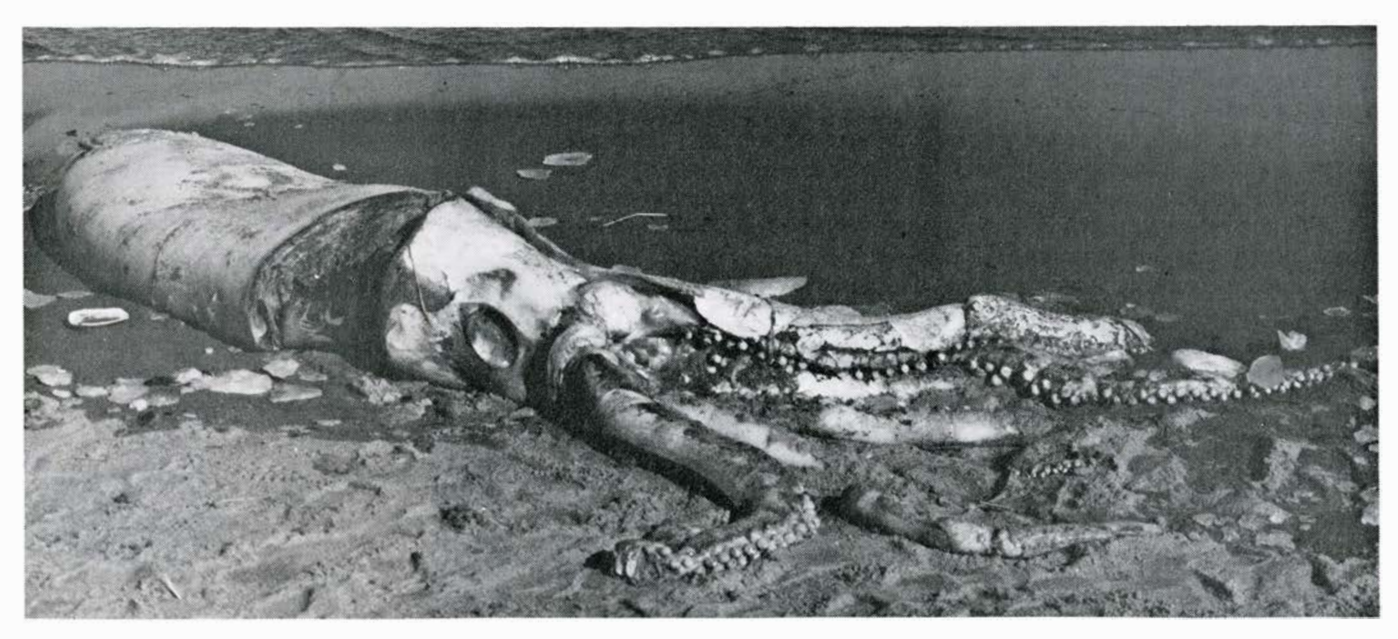
Los machos difieren externamente de las hembras por sus dos brazos hectocotilizados. Los testículos están formados por una masa filamentosa blanca embutida posteriormente en la masa visceral. Los espermatóforos, largos tubos llenos de espermatozoides, se fabrican en el complejo aparato espermatofórico, que se halla en el lado izquierdo anterior del testículo.

El largo saco espermatofórico, de finas paredes (y que a veces recibe el nombre de saco de Needham porque fue descubierto y descrito por vez primera por John Turberville Needham), con su vesícula seminal basal, se halla fijado a la masa visceral a lo largo del lado izquierdo del intestino, en la cavidad paleal. Como todas estas estructuras, es enorme; alcanza una longitud de un metro y sirve de cámara de almacenamiento de cientos (quizá miles) de espermatóforos empaquetados paralelamente.

Con frecuencia se denomina "pene" a la extensión distal del saco de Needham, pero probablemente sea un nombre incorrecto, pues esta estructura no parece ser un órgano intromitente. Incluso en un macho maduro pequeño puede tener unos 80 centímetros de longitud y sobresalir hasta 5,5 centímetros del borde libre del manto. El borde del "pene" tiene forma de seta y posee una hendidura ventral de unos 15 milímetros de longitud.

Los espermatóforos miden entre 10 y 20 centímetros de longitud; varían, al parecer, en longitud total y en el tamaño de las partes constituyentes, según la especie y el estadio de desarrollo. Como en otros calamares, el espermatóforo de *Architeuthis* está dotado de un filamento y un casquete proximales, una célula eyaculadora parecida a un muelle, un cuerpo cementante y una masa espermática distal revestida por una túnica. En *Architeuthis* es peculiar un revestimiento externo de gelatina que recubre el espermatóforo.

Es probable que el calamar gigante, como otros calamares, posea un mecanismo por el que se separen el casquete y el filamento, de forma parecida al pasador de una granada de mano, lo que



CALAMAR GIGANTE VARADO; fue arrojado a la playa en Plum Island, Massachusetts, en 1980. Se trataba de un adulto de tamaño medio, de unos 10 metros de longitud total. La mayor parte de la piel estaba desgastada por la arena, y faltaban los tentáculos (junto con los extremos de algunos brazos). Una indicación del tamaño del animal la proporcionan las huellas humanas en primer plano y las conchas depositadas sobre la playa, en segundo término.

dispara el aparato eyaculador, apretadamente arrollado, que culmina con la expulsión de la cápsula que contiene el esperma y el cuerpo cementante. Este último funciona como un mecanismo adhesivo para fijar la masa de esperma en, o cerca de, la cavidad paleal de la hembra. A lo que parece, los machos alcanzan pronto la madurez sexual; se han encontrado ejemplares con una longitud del manto de menos de un metro que ya tenían espermatóforos completamente formados.

Aunque un calamar gigante es notablemente grande y pesado fuera del agua, dentro de ella tiene una flotabilidad neutra. La flotabilidad se debe a la concentración relativamente elevada de iones amonio (NH_4^+) en los músculos del manto, la cabeza y los brazos. La concentración de iones amonio explica quizá por qué los calamares muertos o moribundos suben a la superficie y son arrastrados con frecuencia hasta la costa. Los iones amonio tienen un peso específico de 1,01, que es inferior al del agua de mar (1,022 a una profundidad de 50 metros y a una temperatura de 28 grados Celsius). Sin los iones amonio, los tejidos del calamar son más pesados que el agua de mar, siendo su peso específico medio de 1,046, pero con ellos el animal puede mantener el nivel en el agua sin tener que gastar energía nadando constantemente.

Un efecto colateral de esta característica es que no hay quien coma de un ejemplar recién varado, tan fuerte y amargo es su sabor a amoníaco. En efecto, la primera observación de que *Architeuthis* concentraba iones amonio en determinados músculos la realizaron tres teutólogos, entre ellos uno de nosotros (Roper), que cocinaron un trozo de calamar gigante con motivo de una fiesta en que celebrábamos la lectura de una tesis doctoral. El análisis posterior del tejido confirmó la observación.

Aunque algunos especialistas han señalado que *Architeuthis* es un potente nadador, no parece probable que sea cierto. Verdad es que algunos calamares oceánicos son nadadores espectaculares, pero, comparado con ellos, *Architeuthis* tiene una musculatura pobremente desarrollada. Además, sus aletas son pequeñas y débiles y, el aparato de cierre del sifón, considerablemente menos complejo y poderoso que el que portan los buenos nadadores.

Se sabe poco de la dieta que consume el calamar gigante. La mayoría de ejemplares recolectados tienen el estómago vacío; si el calamar no estuviera enfermo y "desganado" sería poco probable que hubiera subido a la superficie o hubiera varado. Incluso cuando se encuentra algo en el estómago de un calamar, las probabilidades de identificarlo son escasas, porque el pico y la rádula reducen la presa a pequeños fragmentos, y los enzimas digestivos trabajan deprisa.

No obstante, varios autores han sugerido, o aparentemente observado, que *Architeuthis* se alimenta de pequeños peces y de invertebrados grandes, como otros cefalópodos. Las contadas notas publicadas a partir de los restos de alimento descubiertos en el estómago de calamares gigantes indican que se alimentan efectivamente de peces y otros calamares. Puesto que *Architeuthis* parece ser un nadador más bien mediocre, es presumible que se trate de un depredador relativamente pasivo y lento, incapaz de capturar presas grandes y activas.

¿Quiénes son sus depredadores? El principal, el cachalote, *Physeter catodon*. Algunos peces de las aguas medias del océano comen calamares gigantes inmaturos. Contrarrestan su corta habilidad para nadar otras propiedades: formidables en tamaño y destreza, po-



DATOS SOBRE EL CALAMAR GIGANTE; proceden principalmente de varamientos y de ejemplares encontrados en el estómago de cachalotes. Los avistamientos son menos fiables, pues a distancia un observador podría confundir con un calamar gigante otro tipo de calamar grande. Además de estos

seen brazos que son pesados, provistos de ventosas y muy móviles. Los grandes ojos, que constituyen un eficaz sistema de detección, y el saco de tinta cuentan entre sus mecanismos defensivos.

En la bibliografía se suelen encontrar relatos que hablan de lucha entre el calamar gigante y el cachalote en la superficie del mar. Debemos suponer que una tal lucha es un intento del calamar por escapar del cetáceo, más que un ataque al cachalote por parte del cefalópodo. Las cicatrices de ventosas de calamares gigantes sobre la piel que rodea la boca y la cabeza de los cachalotes atestiguan la realidad de tales enfrentamientos.

Los cachalotes hacen presa en numerosos tipos de peces, crustáceos, pulpos y calamares, pero buena parte de su dieta está compuesta por *Architeuthis*. Aunque en el estómago de un cachalote pueden encontrarse sólo unos cuantos picos de calamar gigante, junto a cientos de picos de otras especies de calamar, el enorme tamaño de un solo calamar gigante puede ocupar la tercera parte del volumen del estómago del cetáceo. El hecho de que el tubo digestivo de un cachalote suela encontrarse lleno de gran número de otras presas, pero con sólo un *Architeuthis*, parece sugerir que los calamares gigantes son animales solitarios, con la salvedad, quizá, del período de apareamiento.

se conocen otros 148 casos, la mayoría en las cercanías de Japón y del extremo austral de Africa.

Se ha escrito mucho sobre el tamaño máximo que alcanza *Architeuthis*, cuya longitud, alguna vez se ha dicho, supera los 75 metros. No hay pruebas firmes de tales asertos. La base usual para los mismos es el tamaño de las cicatrices de ventosas en cachalotes; ahora bien, puesto que una cicatriz crece conforme lo hace el cetáceo, se trata de una prueba no fiable para el tamaño de un calamar, a menos que se pueda demostrar que se trata de una cicatriz reciente.

El mayor ejemplar registrado en la literatura científica medía aproximadamente 20 metros de longitud total. (Quedó varado en una playa de Nueva Zelanda en 1880.) Una parte importante de esta longitud, probablemente de 10 a 12 metros, correspondía a los tentáculos, que en un calamar muerto son notablemente elásticos y se estiran con facilidad. En todas las demás especies de calamares, la longitud de los tentáculos se considera siempre como un componente impreciso de la medida. Las mayores longitudes del manto de calamar gigante que conozcamos oscilan entre cinco y seis metros, y la mayor longitud de la cabeza es de alrededor de un metro.

Incluso con el número relativamente elevado de registros de *Architeuthis* de que hoy se dispone, resulta imposible todavía identificar el hábitat preciso de este esquivo animal. La mayoría de tales informes corresponden a varamientos y a contenidos estomacales de cachalotes, ninguno de los cuales proporciona información directa acerca del hábitat. Se sabe que los cachalotes se alimentan a profundidades que van de los 10 a los 1000 metros, y hay pruebas concluyentes de que descienden hasta los 2000. De sus contenidos estomacales se desprende que bajan hasta el fondo para completar su dieta. De ahí que los *Architeuthis* hallados en los estómagos de cachalotes pudieron haber sido capturados en aguas medias o sobre el fondo. Una conjetura probable, apoyada por el hallazgo de tejido de *Architeuthis* recuperado del estómago de un tiburón abisal capturado sobre el fondo, a 1246 metros, cerca de las Azores, es que los calamares gigantes adultos viven a una profundidad de unos 1000 metros. Pero se trata, aquí también, de una prueba indirecta, ya que algunas especies de peces y de tiburones bentónicos suelen alejarse del fondo para alimentarse.

No deja de llamar la atención las escasas capturas conseguidas por redes de pesca. Se han obtenido algunos ejemplares en redes arrastradas a lo largo del fondo a profundidades de entre 200 y 375 metros. Puesto que se indica que estaban vivos en el momento de la captura, debemos suponer que al recogerse la red se hallaban en su hábitat natural o cerca del mismo, quizá sobre el fondo, pero posiblemente en aguas intermedias.

Recordemos otros casos. Un fragmento recién cortado de 3,5 metros del tentáculo de un calamar gigante se subió a bordo de un arrastrero que operaba a 150 millas de la costa de California, con una red de arrastre de profundidades medias, a una profundidad de 600 metros sobre un fondo de 4000. Se han señalado avistamientos de calamares gigantes nadando en superficie en aguas de Terranova, cerca de los Grandes Bancos, donde el agua no llega a los 100 metros de profundidad, y del Pacífico central, sobre fondos que superan los 4000 metros. En los últimos años se han encontrado ejemplares de *Architeuthis* en las proximidades de las islas Hawai, donde prácticamente no existe plataforma continental y el fondo cae bruscamente hasta varios cientos de metros de profundidad.

Viene luego el capítulo de los varamientos. Muchos de los ejemplares son arrastrados muertos a la costa, pero un número suficiente de ellos se hallan tan frescos (vivos incluso) como para indicar que estaban vivos no mucho tiempo antes o no muy lejos de donde llegaron a tierra. Aun así, los calamares grandes, como los grandes cetáceos, podrían estar vivos cuando varan, pero hallarse asimismo lejos de su hábitat normal, por encontrarse enfermos.

Sorprende que se capturen tan pocos calamares gigantes en redes, en especial hoy, cuando la flota pesquera y los buques de investigación despliegan enormes redes de fondo y de aguas intermedias. ¿Detectan los calamares el acercamiento de una red y evitan la captura, como hacen tantos otros cefalópodos oceánicos? ¿Acaso viven en hábitats que, por ser poco productivos, así las profundidades medias del océano abierto, o demasiado rocosos y escarpados y, por ello, peligrosos para las redes, como los cañones profundos y el borde de los taludes continentales, no suelen recibir la visita de la flota pesquera ni de los buques oceanográficos? El mero planteamiento de cuestiones tan elementales revela por sí mismo cuán lejos nos hallamos de conocer el "misterio" de los calamares gigantes.

Monopolos magnéticos superpesados

Aunque nunca observados, se ha venido postulando la existencia aislada de polos magnéticos norte y polos magnéticos sur. Una nueva teoría aventura la razón de ello: poseen gran masa, son raros y se mueven con lentitud

Richard A. Carrigan, Jr., y W. Peter Trower

En 1269 el francés Petrus Peregrinus, pionero en la investigación de las propiedades magnéticas de los materiales, describió la orientación de limaduras de hierro cuando se hallaban en la vecindad de distintas piedras de imán. Observó que las líneas de fuerza que rodeaban esos imanes naturales se concentraban, invariablemente, en dos puntos, a semejanza de lo que ocurría con los meridianos terrestres, que se juntan en polos geográficos antagónicos. La analogía le valió para denominar esos dos puntos el polo norte y el polo sur del imán. Las observaciones posteriores confirmaron que todos los objetos magnéticos comunes tenían regiones apareadas de polaridad opuesta. O lo que es lo mismo: todos los imanes son dipolos.

No es difícil imaginarse un polo magnético norte aislado o un polo magnético sur también solitario. Y la especulación sobre la posible existencia de tales monopolos magnéticos se ha prolongado a través de los siglos. Pero no hay prueba alguna que revele su realidad. El interés por la idea cobró un nuevo enfoque, más ajustado, en el año 1931, cuando el físico inglés P. A. M. Dirac puso de manifiesto que una propiedad importante que se había observado en las partículas dotadas de carga eléctrica recibiría la explicación adecuada en el caso de que se admitiera la existencia de partículas elementales portadoras de carga magnética. La conjetura de Dirac desencadenó un aluvión de trabajos teóricos sobre las propiedades esperadas de los hipotéticos monopolos. Se emprendieron varios experimentos para detectarlos. Todos fracasaron.

Los esfuerzos recientes encaminados a formular una teoría unificada de las fuerzas fundamentales de la naturaleza han vuelto a poner sobre el tapete el problema de la existencia real de monopolos magnéticos (véase "Monopolos", por Pedro Pascual y Rolf Tarrach, Investigación y Ciencia, septiembre de 1978). Así, una de las teorías propuestas exige su creación en los primeros instantes subsiguientes a la gran explosión iniciadora del universo. La teoría en cuestión explica, además, cómo podrían existir los monopolos y escaparse a todos los intentos de detección realizados: se trataría de objetos extraordinariamente pesados, con propiedades, por tanto, muy distintas de las que caracterizan a las partículas normales. Hay en preparación varios experimentos, de nuevo diseño, que habrán de rastrear los monopolos magnéticos superpesados entre las partículas que persisten desde que ocurrió la gran explosión.

Se demuestra fácilmente la naturaleza dipolar de los materiales magnéticos comunes. Si esparcimos limaduras de hierro sobre un trozo de papel colocado encima de un imán que tenga forma de barra, las limaduras dibujan arcos suaves que se extienden de un extremo a otro del imán. Los arcos representan las líneas de campo magnético entre los polos. En las zonas donde las líneas se aprietan, el campo magnético es fuerte; allí donde se relajan o distancian, el campo magnético es débil. Cortemos el imán por la mitad; no se aislarán los polos. Se crearán dos nuevos imanes en forma de barra más pequeños. (Podemos simular el campo que rodea un polo magnético aislado, colocando en posición vertical el imán, de suerte que haya un polo debajo mismo del papel. Lo que ocurre entonces no es más que la pura eliminación, del plano del papel, de las líneas de fuerza que unen los polos.)

Construyamos un dipolo eléctrico análogo depositando cargas eléctricas de signos opuestos sobre los extremos de una varilla aislante. Cortemos por la mitad el dipolo eléctrico. ¿Qué ocurre? Se crean dos polos eléctricos aislados. La razón estriba en que cada polo eléctrico representa un agrupamiento de partículas individuales dotadas de carga eléctrica: electrones, portadores de carga negativa en un lado, e iones positivos, en el extremo contrario. Al separar los polos, quedan inalterados los agregados de carga. La posibilidad de aislar los polos eléctricos y no los magnéticos constituye una causa fundamental de distinción entre la electricidad y el magnetismo.

La razón de esa diferencia se conoce desde hace más de un siglo. El magnetismo de un objeto común, el de una barra imantada por ejemplo, no se debe a ningún agrupamiento de partículas dotadas de carga magnética, sino a circuitos de corriente eléctrica. Así, el campo magnético de un solenoide (que es un electroimán cilíndrico) se produce por la corriente eléctrica que circula por la bobina. A una escala submicroscópica, la circulación de los electrones en torno a los núcleos atómicos genera corrientes análogas. En los materiales no magnéticos, los átomos, y por ende las corrientes, se hallan orientados al azar. Pero si alineamos los átomos, como sea, el material ofrecerá una magnetización global. En un imán permanente, los átomos mantienen su alineación aun cuando se elimine la fuerza orientadora. Y por más que cortemos en dos el imán, no habrá manera de aislar los polos, ya que cada átomo es, efectivamente, un dipolo.

Esa diferencia básica entre la electricidad y el magnetismo constituye el núcleo de la teoría de los fenómenos electromagnéticos que formulara, en 1864, James Clerk Maxwell. En ella no entra la posibilidad de cargas magnéticas aisladas, puesto que nadie las había observado. Todo el magnetismo se explicaba como cargas en movimiento. A lo largo de los últimos cien años, se ha sometido la teoría de Maxwell a múltiples ensayos experimentales. No se le ha encontrado punto débil alguno. Hecho que, por sí solo, limita poderosamente los contextos donde pudieran hallarse monopolos magnéticos.

¿En qué consistió la aportación de Dirac? Pretendía él explicar la cuantificación de la carga eléctrica: el que la carga eléctrica siempre apareciera en múltiplos enteros de la carga del electrón y del protón. Y llegó a la demostración de que si en algún punto del universo había un polo magnético aislado, entonces la carga eléctrica debía estar cuantificada por doquier. Hasta hace poco, la hipótesis del monopolo magnético constituía la única explicación de la cuantificación observada de la carga eléctrica. (La existencia real de las partículas llamadas quarks, a las que se asignan cargas de un tercio y dos tercios de la magnitud de la que posee el electrón, no alteraría la conclusión de Dirac. Muchos físicos opinan que los quarks se hallan en permanente confinamiento dentro de partículas que tienen siempre un valor entero en carga total.) [N. T.: Dirac probó que, si existe un monopolo magnético, la carga eléctrica debe estar cuantificada, es decir, debe ser un múltiplo entero de una carga elemental, pero no se puede calcular el valor de ésta.]

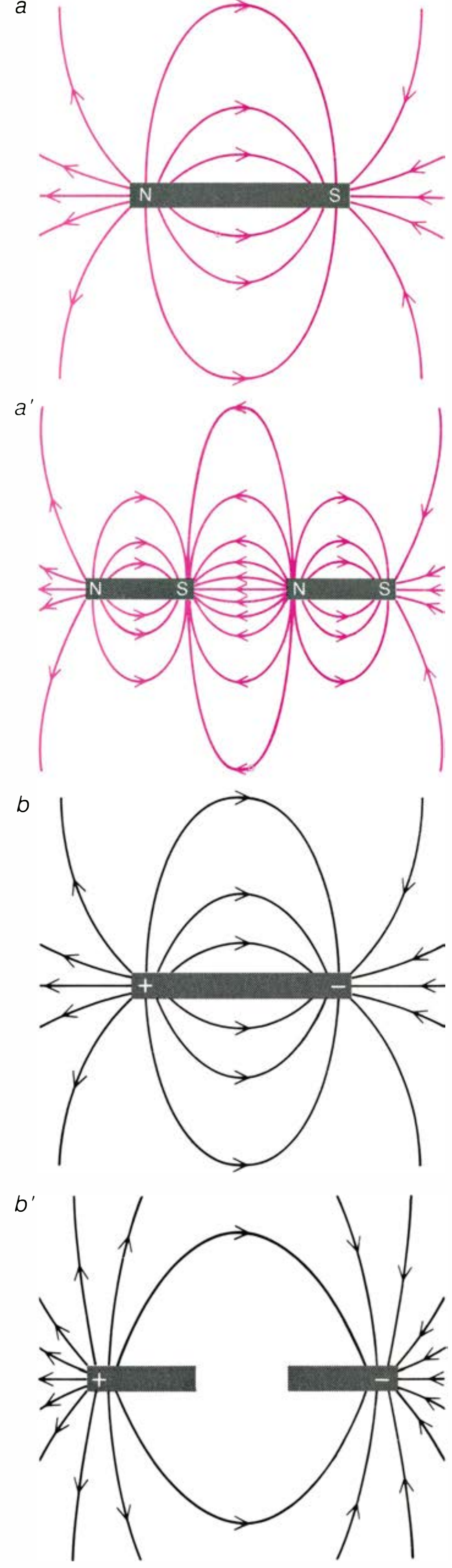
Podemos seguir el razonamiento subyacente a la proposición de Dirac sin perdernos en su complejidad matemática. Todo átomo excitado hasta un estado de alta energía tiende a volver bruscamente a otro de energía menor, emitiendo al propio tiempo su energía sobrante en forma de un fotón, que así se llama el cuanto de radiación electromagnética. Además de llevarse energía del átomo, el fotón le roba parte de su momento angular intrínseco. Así pues, podemos afirmar que el campo electromagnético representado por un haz de luz contiene cierta cantidad de momento angular.

No encierra especial dificultad calcular la cantidad de momento angular de un campo electromagnético. En efecto, ochenta y pico años atrás J. J. Thomson sugería en un manual de electricidad y magnetismo el ejercicio siguiente a los estudiantes: Determinar el momento angular de un sistema ligado por fuerzas electromagnéticas que consta de una sola carga eléctrica y una carga magnética. Manifiesta la solución que el momento angular del sistema depende del producto de la carga eléctrica por la carga magnética, pero no depende de la distancia entre ambas. Dicho de otra manera: la carga eléctrica y la carga magnética pueden distar el radio atómico o el radio del universo entero; en ambos casos, el momento angular del campo electromagnético será el mismo.

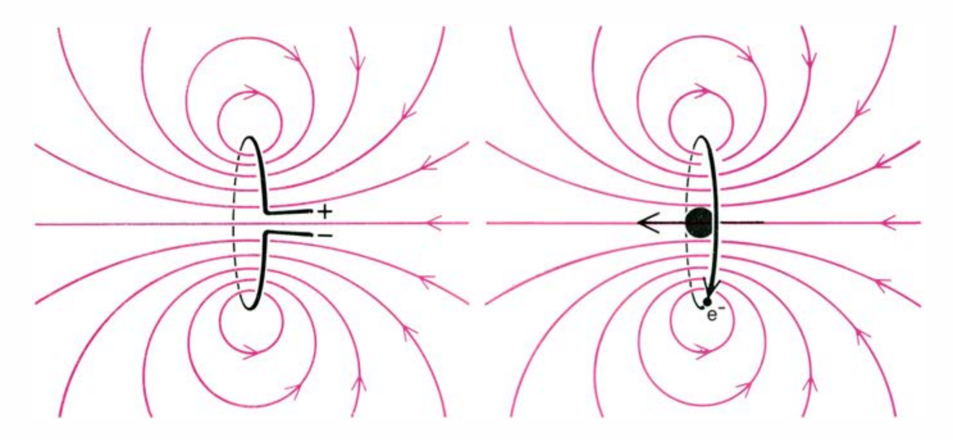
Sabemos hoy que el momento angular de cualquier sistema de este tipo se halla cuantificado: la mínima cantidad de momento angular que hay en la naturaleza equivale a la unidad llamada constante de Planck y todas las cantidades superiores son múltiplos de dicha unidad. Si se supone que el momento angular del sistema es igual a un número de veces dado la cantidad de Planck y que la carga magnética tiene un valor definido, síguese entonces que la carga eléctrica posee asimismo un valor fijo. Y así fue como llegó Dirac a demostrar, matemáticamente, que, de existir una carga magnética, la carga eléctrica tendría que estar cuantificada.

La teoría de Dirac incorporaba un objeto matemático curioso, al que él dio el nombre de cuerda. La cuerda de Dirac se parece a un solenoide de longitud infinita con un monopolo magnético en un extremo; el resto del cordel se pierde en la distancia. Pero la cuerda constituye un obstáculo para los cálculos pormenorizados que se fundan en el modelo de Dirac. Los avances registrados en física matemática han conseguido librar al monopolo de tan molesta cola.

La condición de cuantificación de Dirac dota al monopolo de ciertas propiedades. Así, la explicación de la cuantificación observada en el momento angular de un campo electromagnético exige que la unidad mínima de carga magnética sea unas 70 veces la unidad correspondiente de carga eléctrica. Predice también el modelo de Dirac que toda partícula de materia, monopolo magnético incluido, ha de tener su partícula de antimateria correspondiente. Del mismo modo que el electrón posee su antipartícula (el positrón, descubierto en 1932, cuatro años después de que Dirac postulara su existencia), se espera que el monopolo magnético tenga un antipolo magnético. Y siguiendo la no-



CAMPOS DIPOLARES creados por una barra imantada (*a*) y por una estructura análoga formada por una varilla aislante que porta cargas eléctricas opuestas depositadas en sus extremos (*b*). Si partimos por la mitad el imán, aparecen dos dipolos más pequeños (*a'*). Pero si cortamos por la mitad el análogo eléctrico, el campo permanece dipolar porque las cargas eléctricas que generan el campo persisten en su sitio (*b'*). En color, las líneas de campo magnético; en negro, las del eléctrico.



LA CARGA ELECTRICA que circula en un anillo conductor genera un campo dipolar magnético con su eje orientado perpendicularmente al plano del anillo (*a la izquierda*). El movimiento de los electrones ligados alrededor de un núcleo atómico constituye un anillo similar de corriente y dota al átomo de un campo dipolar correspondiente (*a la derecha*). Sólo se ofrece un electrón, a modo de representación.

menclatura arbitraria de Peregrinus, llamaremos a una partícula de ese par monopolo norte y, a la otra, monopolo sur. La teoría de Dirac no prevé la masa o el tamaño de los monopolos magnéticos, ni tampoco avanza nada sobre su abundancia en el universo.

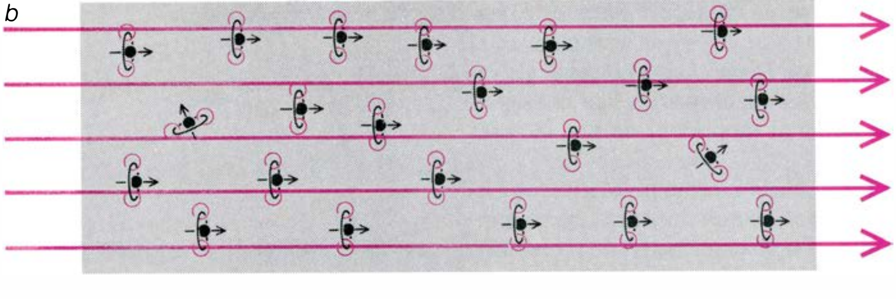
Cuando ampliamos las ecuaciones de Maxwell sobre el electromagnetismo para dar cabida a las cargas y a las corrientes magnéticas aparecen algunos efectos de interés. Así, a medida que la velocidad de movimiento de una carga eléctrica se acerca a la velocidad de la luz, sus propiedades debieran aproximarse cada vez más a las que caracterizan a la carga magnética; de forma análoga, el monopolo magnético en movimiento comenzaría a presentar propiedades semejantes a las de la carga eléctrica conforme su velocidad se fuera aproximando a la de la luz. Esas transformaciones, que se deducen de la teoría de la relatividad especial de Einstein, han recibido confirmación experimental en lo concerniente a cargas eléctricas en movimiento. No, obviamente, para el caso de cargas magnéticas en movimiento.

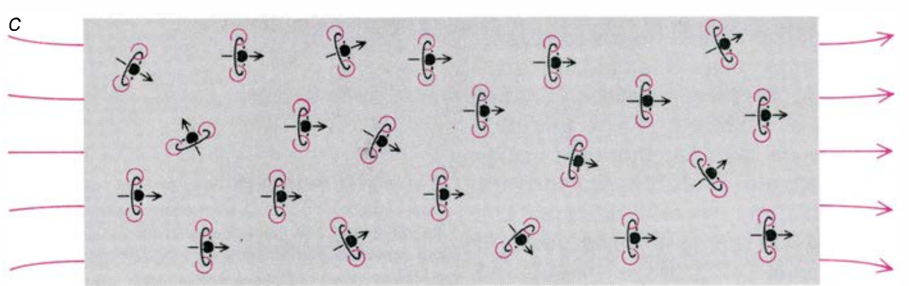
La carga eléctrica en movimiento puede perder energía ionizando la materia (esto es, arrancando electrones de sus átomos). La energía se pierde, típicamente, a razón de unos millones de electronvolt por centímetro recorrido a través de una sustancia. La energía necesaria para ionizar un átomo suele rondar algunas decenas de electronvolt, lo que significa que una carga eléctrica en movimiento ionizará centenares de miles de átomos por centímetro.

Y por ser la carga del monopolo magnético mucho más intensa, ionizaría éste los átomos con un rendimiento 10.000 veces superior. Un monopolo magnético que pasara a través de una emulsión fotográfica, de las que emplean los físicos para detectar partículas portadoras de carga eléctrica, dejaría un rastro miles de veces más obscuro que el impreso por una carga eléctrica que avanzara a la misma velocidad. Puesto que el monopolo perdería energía con suma rapidez en el proceso de ionización, al penetrar en una sustancia veríase frenado mucho antes que una partícula cargada eléctricamente que llevara la misma energía cinética.

Sigamos con las comparaciones. Así como un campo eléctrico puede acelerar una partícula cargada eléctricamente, el campo magnético podría hacer lo propio con un monopolo magnético. Mas, debido a la mayor intensidad polar de la partícula magnética, ésta ganaría energía en un campo magnético más deprisa que lo consiguiera la partícula cargada eléctricamente en un campo eléctrico equivalente. Un monopolo magnético que atravesara una bobina superconductora de un metro de longitud ganaría más energía que la que adquiriese un protón en el mayor acelerador de partículas construido hasta la fecha.

Posee la física de los monopolos otro rasgo curioso, que se nos pone de manifiesto cuando imaginamos que el tiempo corre hacia atrás. En un experimento ideal, sugerido por Robert K. Adair,





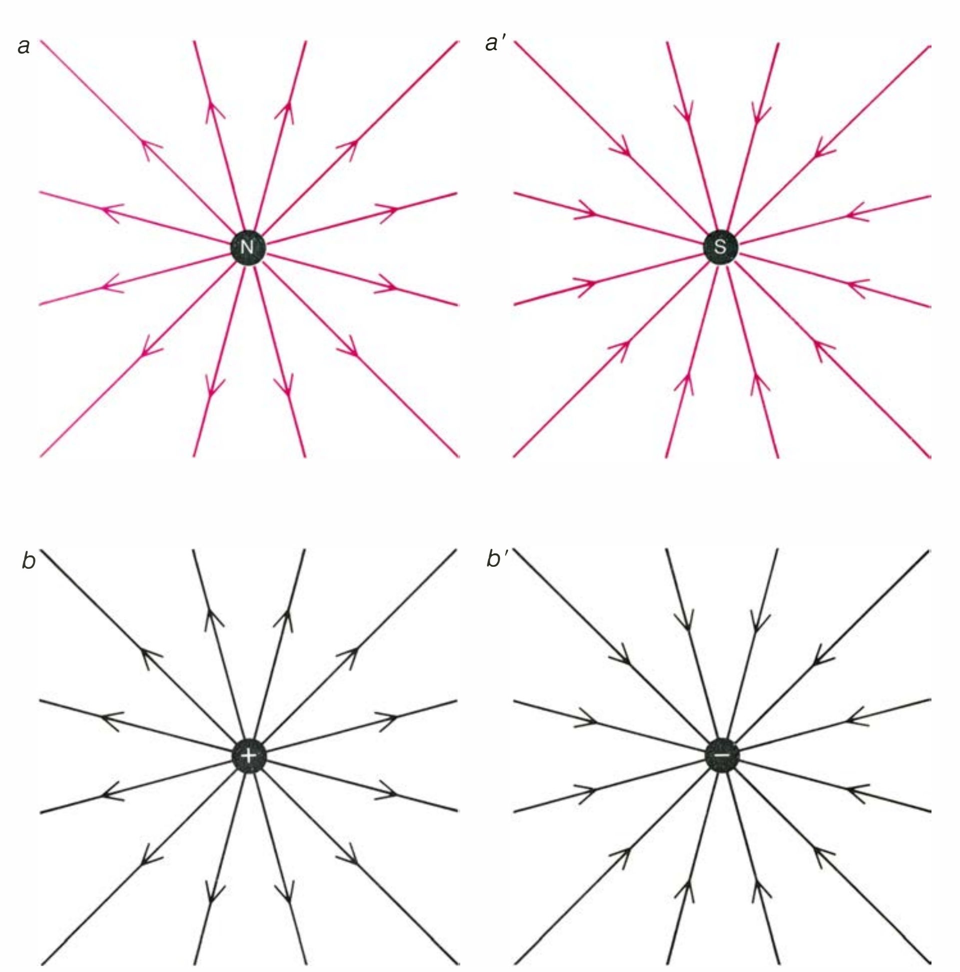
IMANES ATOMICOS orientados al azar en una barra de hierro ordinaria no magnética (*a*). Los átomos pueden alinearse por la aplicación de un campo magnético externo (*b*). Cuando se elimina el campo (*c*), quedan alineados muchos átomos, formando un imán permanente. Que cortemos entonces el imán por la mitad no produce ningún efecto sobre las corrientes atómicas; no servirá, pues, para aislar los monopolos magnéticos. Por mor de simplicidad, se dibuja la barra como si tuviera un solo dominio magnético.

de la Universidad de Yale, se supone un protón en movimiento en un campo magnético, que le obliga a describir una trayectoria curva. Según una versión, el campo magnético lo produce una corriente eléctrica de la bobina. Invertir entonces el sentido del tiempo comporta invertir el movimiento del protón y el de los electrones que constituyen la corriente y, por ende, queda también invertido el campo magnético. En esas circunstancias, el protón no hace más que volver a recorrer, ahora en sentido opuesto, el mismo camino. Y se dice, a este propósito, que la trayectoria seguida por el protón es invariante bajo inversión temporal.

Vayamos a la otra versión, aquella en que se supone que el campo magnético lo origina la presencia de un monopolo magnético. La inversión del tiempo no altera la polaridad de un monopolo; por consiguiente, deja inalterado el sentido del campo magnético. Como sucedía antes, el protón invierte su sentido, pero no deshace su camino. En resumen: la trayectoria del protón en el campo de un monopolo depende del sentido del tiempo, efecto éste que viola el principio de la invariancia bajo inversión temporal.

Durante muchos años se apoyaron los contrarios a la existencia de los monopolos magnéticos en los efectos que predecía la teoría para éstos cuando se invertía el tiempo. Pero ya en 1964, Val L. Fitch, James W. Cronin y colegas, de la Universidad de Princeton, descubrieron, en un experimento realizado en el Brookhaven National Laboratory, un efecto análogo al de la violación de la invariancia bajo inversión temporal en la desintegración de las partículas llamadas kaones neutros. El profundo significado teórico de ese hecho se está empezando ahora a conocer y ponderar. Y a medida que se avanza en su comprensión, va perdiendo fuerza la oposición a la noción de monopolos magnéticos.

Habida cuenta de las atrayentes propiedades que rodean a los monopolos magnéticos, ¿en qué situación se halla su búsqueda experimental que ratifique la existencia de los mismos? A cada nuevo acelerador de partículas que entra en funcionamiento le acompaña una búsqueda inmediata de monopolos en los restos de las colisiones entre partículas de altas energías iniciales. Rastreos que se han convertido en un rito rutinario. También se les ha buscado en los residuos de las colisiones entre rayos cósmicos y átomos atmosféricos. Y experimentos de otro tipo se han aprestado a localizarlos entre los átomos de hierro de sustancias terrestres y extraterrestres. Hasta la fecha, todos los esfuerzos han fracasado.



SIMETRIA entre monopolos magnéticos y partículas dotadas de carga eléctrica. Esa propiedad se extiende, en teoría, hasta sus contrapartidas de antimateria. Un monopolo norte (*a*) tendría de antipartícula un monopolo sur (*a'*), igual que un protón (*b*) tiene al antiprotón (*b'*) como antipartícula suya.

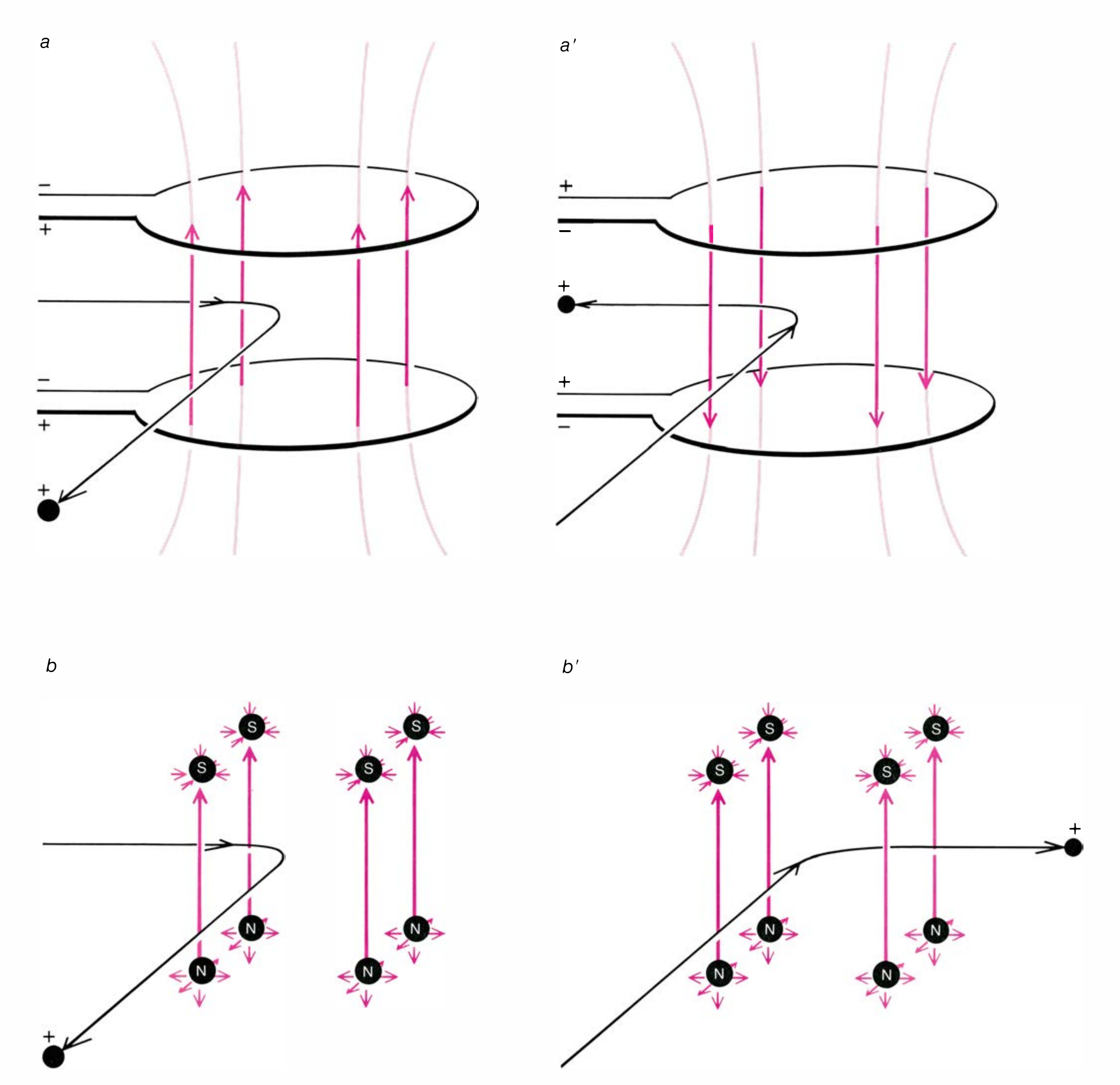
¿Cómo se realizan esos experimentos? Está el método de búsqueda en el hierro expuesto a un haz de partículas de alta energía de un acelerador. Si el haz produjera los monopolos, algunos tendrían que quedar ligados al hierro por inducción de una carga magnética opuesta en el material (a semejanza del cuaderno de notas imantado que se pega a la pared de una nevera). Un potente electroimán arrancaría del hierro los monopolos. Así liberados, los detectarían contadores de partículas especialmente diseñados para registrar sólo las partículas que ionizaran a alta intensidad. Este método de obtención sirve también para otra fuente potencial de material: en el caso de muestras de mineral hierro recogidas de las rocas que afloran en montañas muy viejas. En él trabajó, en la década de los 40, Willem Malkus, de la Universidad de Chicago.

Otro método de búsqueda, debatido en la década de 1960, fue el que puso en práctica, diez años más tarde, Luis W. Alvarez y sus colegas en el Lawrence Berkeley Laboratory de la Universidad de California. En su dispositivo, se hace pasar, una y otra vez, a través de una bobina superconductora una muestra de material del que se sospecha que encierra monopolos magnéticos. Por cada pasada de un monopolo magnético, la corriente eléctrica de la bobina aumentaría en una pequeña cantidad. Por tratarse de una bobina superconductora, el incremento de corriente inducido persistiría indefinidamente. El trabajo se limitaría entonces a medir una señal, sumamente débil, inducida por pasos múltiples de un único monopolo. A través de esa técnica el grupo de Alvarez demostró que la densidad de monopolos magnéticos en muestras recogidas de la superficie lunar no llegaba ni al uno por cada 10^{28} protones. A pesar de esa limitada proporción, podría haber un promedio de un monopolo por cada 20 kilogramos de materia.

La búsqueda de los monopolos se sirve también de otros procedimientos menos directos: se buscan señales de creación y destrucción del par monopo-

lo-antimonopolo. La teoría admite la creación de ese par cuando un fotón de alta energía pasa cerca de un protón, tal como se sabe que ocurre en la producción de un par electrón-positrón [*véase la ilustración de la página 76*]. Pero los monopolos con cargas opuestas apenas durarían un brevísimo intervalo de tiempo. No tardarían en atraerse mutuamente, curvando sus trayectorias de suerte tal que emitirían fotones de *bremsstrahlung*, o "radiación de frenado". En seguida estarían juntos y se aniquilarían uno al otro, convirtiendo su masa en nuevos fotones.

En ese mecanismo hipotético se fundaron Malvin A. Ruderman y Daniel Zwanziger, de la Universidad de Nueva York, para explicar, a mediados de la década de los 60, unos sucesos extraños que se habían registrado en la radiación cósmica a finales de la década de 1950. ¿Qué eran tales sucesos? Constaba cada uno de un chorro muy denso y energético de cascadas de electrones inducidas por fotones, en las que no había indicio de partículas nucleares que interactuasen fuertemente. Pero en dos experimentos subsiguientes, realizados en el gran acelerador de protones del Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), no aparecieron pruebas de ese tipo de cascadas. (De un experi-



INVERSION TEMPORAL, cuyo efecto sobre una partícula portadora de carga eléctrica que se moviera en el campo magnético creado por un monopolo sería muy peculiar. En *a*, se representa un protón que corre a lo largo de una trayectoria curva que atraviesa un campo magnético perpendicular, campo que lo han generado corrientes eléctricas que fluyen por un par de anillos de alambre. Si se invierte el sentido del tiempo (*a'*), quedarán asimismo invertidas ambas corrientes (y, por ende, el campo magnético) y el movimiento del protón. Pero la trayectoria del protón restaría invariante: la partícula tornaría a recorrer el mismo camino, ahora en sentido opuesto. En *b*, se ilustra un protón que se mueve por una trayectoria análoga a través de un campo magnético producido por un conjunto ideal de monopolos norte y sur. En este caso, al invertir el tiempo, no cambiaría el campo magnético (*b'*). Si bien el protón invertiría el sentido de su dirección, no volvería al trayecto anterior; resultado que violaría el principio de invariancia bajo inversión temporal.

mento se encargó un grupo procedente del Instituto Politécnico de Virginia y, del otro, un equipo de la Universidad de Michigan.) Si el proceso ocurre en realidad, quizá se presente sólo a energías superiores a las que disponemos todavía en nuestros aceleradores de partículas. Cabe la posibilidad de que se trate de un proceso mucho menos frecuente de lo que sugieren los datos que tenemos de la radiación cósmica.

En 1975, los físicos de todo el mundo se sobresaltaron ante el anuncio del descubrimiento de un monopolo magnético. Lo lanzaron investigadores de la Universidad de California en Berkeley y la Universidad de Houston. La prueba era una traza de un grosor insólito y obscura, originada, presumiblemente, por rayos cósmicos, que había quedado registrada en un rimero de emulsiones fotográficas y hojas de plástico. Se había expuesto el detector a la radiación cósmica mientras pendía de un globo que volaba a gran altura, durante dos días y medio. Pero la interpretación del suceso como prueba del paso de un monopolo magnético recibió una crítica inmediata y general. Este tipo de experimentos de radiación cósmica se caracterizan por un factor área-tiempo: una medida de la superficie del detector multiplicada por el tiempo de exposición. El detector donde se había visto la traza candidata a monopolo tenía un factor área-tiempo del orden del millón de veces menor que la alcanzada en búsquedas anteriores, y en las que no se había visto monopolo alguno. Sin ir más lejos, las rocas lunares objeto del análisis de Alvarez y su grupo habían estado expuestas a partículas de todas las clases a lo largo de miles de millones de años.

Otros problemas involucrados en la interpretación del suceso en cuestión como un monopolo llevaron luego a sugerir si no pudiera deberse la traza al paso de un núcleo atómico superpesado o una antipartícula de gran masa. El episodio tuvo su lado positivo; inspiró una valoración cuidadosa de la cuestión fundamental: ¿de qué manera perdería energía el monopolo a través de la ionización? Cuestión que, sin embargo, sigue planteada.

Por esas mismas fechas, las perspectivas de los cazadores de monopolos se tornaron, de repente, mucho más halagüeñas. Cada uno por su lado, Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht, y Alexander M. Polyakov, del Instituto Landau de Física Teórica, con sede en los aledaños de Moscú, llegaron al descubrimiento de que había una determinada clase de teorías de las interacciones entre partículas elementales que no sólo permitían los monopolos magnéticos, sino que llegaban a implicarlos. Todavía más. Las nuevas teorías, las llamadas gauge, indicaban que los monopolos debían poseer una masa mucho mayor que cualquiera de las partículas observadas, o predichas, hasta entonces. Si se volvía la mirada hacia atrás, no habíamos de sorprendernos de que no se hubieran detectado.

Los monopolos magnéticos de 't Hooft y Poliakov no sólo difieren de los que propusiera Dirac en cuanto a su masa, abultadamente grande. Hay otros puntos de distanciamiento. Los de 't Hooft-Poliakov no necesitan ninguna cuerda. Ni tampoco son partículas puntuales, aun cuando se les supone demasiado pequeños para una medición directa.

Los monopolos superpesados de 't Hooft-Poliakov desempeñan un destacado papel a la hora de intentar construir una "teoría de gran unificación" que dé razón conjunta de tres fuerzas de la naturaleza, de las cuatro que se conocen. Dos de ellas, la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil, admiten ya una descripción única a través de la teoría electrodébil; esta teoría, que ha cosechado grandes éxitos, aborda esas dos interacciones como manifestaciones distintas de una sola fuerza subyacente. La meta a la que tienden la mayoría de los esfuerzos actuales por crear una teoría de gran unificación es llegar a una estructura matemática más general, que incorpore la fuerza electrodébil y la nuclear fuerte (dejando sólo fuera la cuarta fuerza conocida, la gravedad).

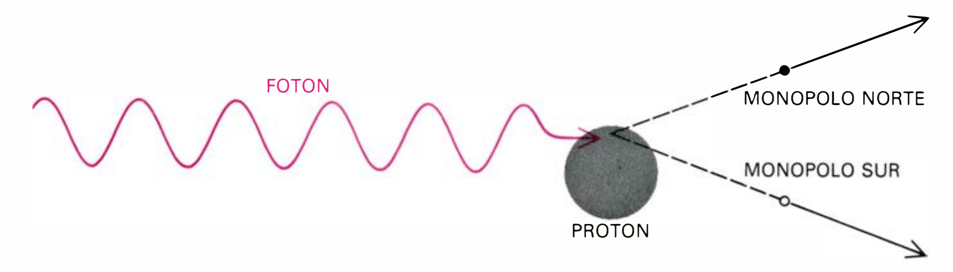
La predicción de que el protón se desintegra en otras partículas constituye una de las consecuencias de mayor interés que ofrecen esas teorías de gran unificación. Para explicar semejante desintegración se introducen nuevas partículas: los llamados leptoquarks, que cambian los quarks (presuntos constituyentes de partículas tales como el protón) en leptones (partículas, el electrón entre ellas, que responden a la acción de la fuerza nuclear débil, pero no a la de la fuerte). Los leptones serían extraordinariamente pesados, quizá 10^{14} veces más que el protón. Si, como sugiere la hipótesis de 't Hooft-Polyakov, el monopolo magnético superpesado está asociado con los leptoquarks, aquél vendría a tener una masa de unas 10^{16} veces la del protón, es decir, en torno a los 20 nanogramos. Se trata de una masa elevadísima para una partícula elemental, comparable con la de un paramecio o una ameba.

Los monopolos superpesados sólo podrían haberse creado en los primeros 10^{-35} segundos después del nacimiento del Universo. La gran explosión de la creación sería el único suceso lo bastante caliente para originar tales partículas. (Se cifra en torno a los 10^{30} grados Kelvin.) Se habrían formado monopolos magnéticos norte y sur; una pequeña fracción de los cuales se habrían recombinado y aniquilado mutuamente. Pero la mayoría de los monopolos superpesados habrían escapado de una muerte precoz, y no hay razón para pensar que no hayan persistido hasta hoy. Aunque se desconoce dónde pudieron almacenarse a medida que evolucionaba el universo, lo cierto es que tampoco se sabe con seguridad cómo evolucionó el universo desde la gran explosión hasta las estructuras galácticas que ahora observamos.

Posee nuestra galaxia un rasgo que nos permite poner un coto muy restrictivo al número de monopolos magnéticos que puede albergar. La galaxia tiene un campo magnético. Aunque es débil (del orden de una cienmilésima del campo magnético terrestre), se extiende hasta enormes distancias. El monopolo que quedara atrapado en él, recibiría una aceleración hasta una energía muy elevada y acabaría por escaparse de la atracción gravitacional de la galaxia. Mas por ser los monopolos extraordinariamente pesados, se moverían a gran lentitud (a milésimas de la velocidad de la luz).

Eugene N. Parker, de la Universidad de Chicago, ha señalado que si corrieran muchos monopolos de ésos por la galaxia destruirían el campo magnético galáctico. Apoya su razonamiento en el hecho de que el campo magnético de la galaxia esté generado por la circulación a gran escala de partículas cargadas eléctricamente. Al acelerarse un monopolo magnético, éste tomaría energía del campo galáctico frenando las corrientes de las cargas eléctricas en movimiento. Por tanto, la existencia de un campo magnético galáctico pone una cota superior a la población de monopolos magnéticos en la galaxia.

El tema de la densidad máxima de monopolos en el universo está relacionado con el problema, no resuelto todavía, de si el universo continuará expansionándose indefinidamente o terminará por colapsarse. La respuesta la



PAR FORMADO POR UNA PARTICULA Y SU ANTIPARTICULA. Consta, en este caso, de un monopolo norte y un monopolo sur; se crearía cuando un fotón de alta energía, o cuanto de radiación electromagnética, interaccionara con una partícula dotada de carga eléctrica, un protón por ejemplo. La atracción mutua entre monopolos les obligaría a chocar, convirtiéndose así su masa en nuevos fotones.

tiene la cantidad de materia que haya en el universo. La cantidad de masa visible (esto es, la masa de objetos luminosos tales como las estrellas) no basta para frenar la expansión, pararla y hacerle, por último, invertir el sentido. A menos que exista masa adicional de la que no tenemos observación visible, la expansión del universo se irá frenando, pero no se detendrá nunca.

¿Hay en el universo suficiente masa invisible hasta el punto de afectar a su destino? ¿Qué tipo de materia podría abundar y esté por detectar todavía? Quizá tengan una respuesta de esa masa que falta los neutrinos, que apenas si interactúan con las demás partículas y no emiten nunca luz. Se creyó durante muchos años que los neutrinos carecían de masa; hoy, por contra, se especula mucho en torno a su posible masa, aunque pequeña. Se supone que los neutrinos llenan el universo con una densidad media de un millón por centímetro cúbico, aproximadamente, lo que implica que, incluso concediéndoles una masa pequeña, constituirían una fracción destacada aunque no superase tal vez la cantidad de masa visible. [N. T.: La densidad media de cada clase de neutrinos es, en la actualidad, de unos 100 neutrinos por centímetro cúbico.]

Con toda probabilidad, los monopolos magnéticos superpesados radiarían escasa luz y serían asimismo un componente invisible del universo. Admitiendo para ellos una masa 10^{16} veces mayor que la del protón, tampoco se necesitarían tantos para aumentar mucho la masa total. Con una concentración de un monopolo por cada 10^{16} protones habría tanta masa encerrada en los monopolos cuanta abunda en la materia luminosa. No parece verosímil que la masa total del universo sea muy superior a 10 veces la visible; de donde cabe inferir que el cociente entre monopolos magnéticos y protones tiene un límite superior que no llega a la razón de uno entre 10^{15}.

En 1979, John P. Preskill, a la sazón estudiante de doctorado en la Universidad de Harvard, combinó el modelo de gran unificación de las fuerzas fuertes, débiles y electromagnéticas con la cosmología standard para defender que tendría que haber un monopolo por cada protón del universo, aproximadamente. Por otro lado, del análisis del ritmo de expansión del universo resultaba que no debería haber ni siquiera un monopolo por cada 10^{15} protones. Preskill planteó entonces el dilema siguiente: O bien el papel asignado a los monopolos magnéticos en las teorías de gran unificación no es correcto o bien la cosmología standard es falsa. Para salvar el dilema de Preskill se ajusta el modelo cosmológico, permitiendo más aniquilaciones monopolo-antimonopolo en los primeros instantes del universo. Cabe también la opción de suprimir, a través de algún mecanismo no especificado, el ritmo de producción inicial de monopolos estimado.

Recientemente, George Lazarides, Qaisar Shafi y Thomas Walsh, de la Organización Europea de Investigación Nuclear (CERN), cuya sede está en Ginebra, abordaron de qué manera podría reducirse la densidad de monopolos magnéticos predicha para el universo, centrándose en el ajuste de la teoría de partículas o en el de la teoría cosmológica. Llegaron a la conclusión de que la interacción entre los monopolos y el campo magnético galáctico ponía un límite al cociente del número de monopolos magnéticos al de protones, cifrado en torno al uno por 10^{20}. Si esta es la abundancia, sería de esperar que cada año unos 200 monopolos atravesaran un área de un kilómetro cuadrado. Cálculos más conservadores, que parten de una distribución más uniforme de monopolos en el universo, daría un flujo de unos cuantos monopolos por año y kilómetro cuadrado.

Por vez primera, la teoría de los monopolos magnéticos daba una estimación de la masa y el flujo esperados de los mismos. No obstante su carácter aproximativo, el físico experimental dispone ya de unos datos estimativos que abren un campo nuevo a la exploración. El flujo de monopolos magnéticos predicho es pequeño, pero no hasta el punto de impedir su detección.

Un lugar donde buscar monopolos superpesados es entre los efectos naturales de gran escala. Se trata de la misma dirección que ya apuntara Parker diez años atrás. Uno de los autores (Carrigan) se ha entretenido en averiguar cuál habrá sido el destino de los monopolos en el material que fue agregándose hasta formar el sistema solar. Sugiere él que, a medida que fue condensándose la Tierra, los monopolos magnéticos podrían haberse hundido hacia el centro bajo el influjo de los campos gravitacional y magnético del planeta. Los monopolos norte se habrían concentrado cerca del polo sur geomagnético, y viceversa.

Nos dice la geología que el campo magnético terrestre se ha invertido varias veces. Inversiones del campo que habrían causado que las dos poblaciones separadas de monopolos emigraran una hacia la otra, para luego cruzarse. Durante el trayecto se aniquilarían varios monopolos y antimonopolos, liberando una cantidad altísima de energía, correspondiente a su masa. La medición del flujo de calor en la superficie de la tierra nos puede ofrecer un límite bastante aproximado del número de monopolos que quedaron atrapados en el núcleo. La cifra que resulta de ese cálculo concuerda con otros límites experimentales sobre la abundancia de monopolos superpesados.

Un camino más directo es el de la construcción de un detector idóneo para la caza de esas partículas pesadas y de rara frecuencia. Lo difícil del caso es que no es cosa obvia diseñar un aparato tal. El arte de la búsqueda de monopolos se encuentra en uno de esos momentos de la historia de la ciencia en que las ideas surgen por doquier sin orden ni concierto, algunas muy peregrinas, y se debaten sobre el papel o en charlas de sobremesa. Se sospecha que los monopolos viajarán con lentitud, a velocidades muy inferiores a las de la luz. Nada hay de seguro sobre lo que ocurra cuando una partícula tan lenta choque contra un átomo.

La colisión de un monopolo superpesado con un núcleo atómico estacionario pudiera parangonarse con la pasada

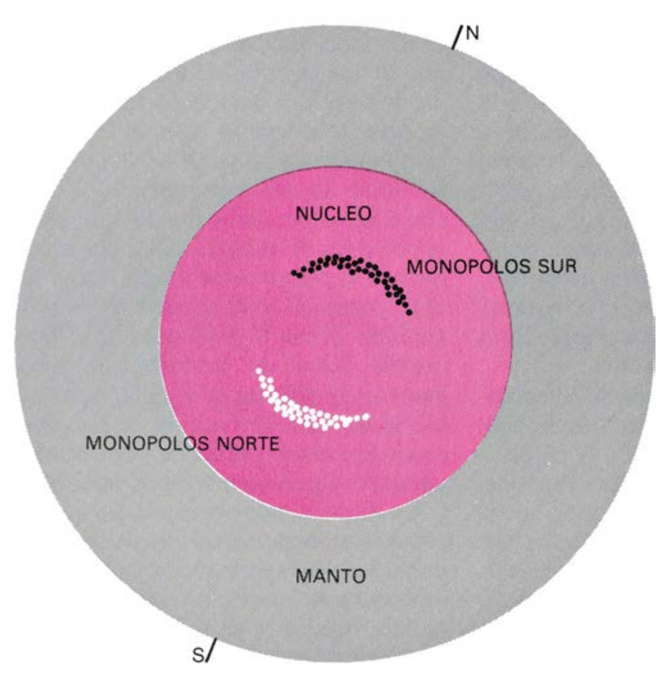
de la apisonadora por encima de una hormiga. Un monopolo procedente de radiación cósmica perdería gran cantidad de energía en los múltiples encuentros de ese tipo que sufriría a medida que se fuera abriendo camino a través de la tierra, pero también podría salir indemne por el otro lado del planeta. En esas circunstancias, resulta arriesgado predecir qué grado de ionización se observaría en un detector. Según unos, hay número suficiente de monopolos lentos que nos permiten usar detectores basados en la ionización. Pero otros opinan que serán escasas las ocasiones en que se vea la ionización, amén de serlo débilmente, lo que exigiría el recurso a técnicas no habituales para detectar tales partículas. En cualquier caso, queda patente la necesidad de un detector descomunal para que el experimentador observe un suceso de tipo monopolo a lo largo de toda su vida.

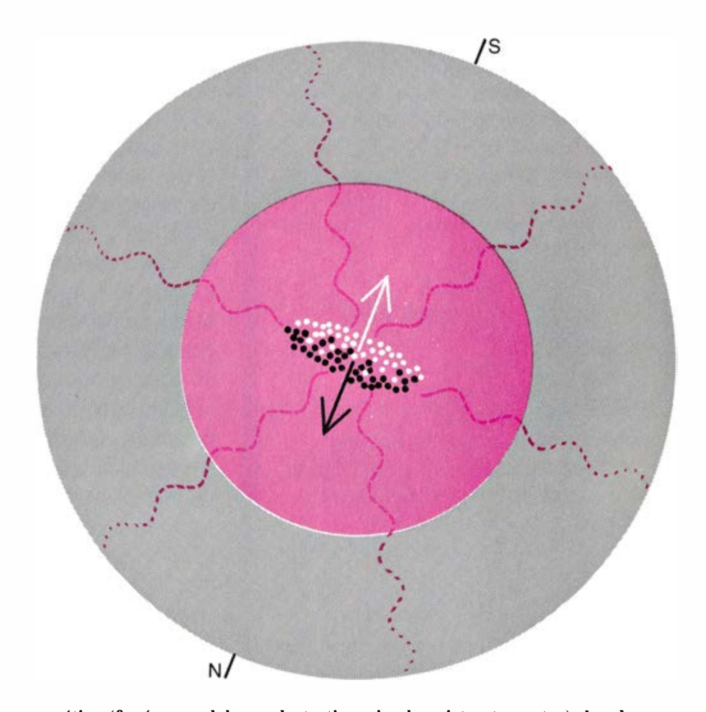
Haven E. Bergeson, George L. Cassiday y Eugene C. Loh, de la Universidad de Utah, han proyectado un detector que registra la luz generada por ionización; el aparato cubre, además, bastantes kilómetros cuadrados. Lleva el nombre de detector de ojo de mosca y consta de un conjunto de tubos fotomultiplicadores dirigidos al cielo nocturno. Registra la luz emitida por partículas secundarias que se producen en las escasas interacciones de rayos cósmicos de energía ultraalta, en la parte superior de la atmósfera. Cuando desciende hacia la tierra la cascada de partículas secundarias, chocan éstas contra los átomos de nitrógeno que hay en la atmósfera, provocando su centelleo. El detector de ojo de mosca distinguirá esa luz siempre que la energía total liberada en el suceso equivalga, por lo menos, a 100 millones de veces la masa del protón. El tránsito de un monopolo magnético originaría, incluso con el cálculo más optimista respecto de su ritmo de ionización, menos de la diezmilésima parte de la luz necesaria para disparar el detector.

La capacidad que posee el detector para recoger los centelleos inducidos por partículas está condicionada, de un modo limitante, por la iluminación de fondo de las estrellas, por los aviones que lo sobrevuelan y por otras fuentes (donde incluiremos las señales luminosas de torres de radio distantes). Alguien ha avanzado la idea de que el problema de la luz de fondo se aliviaría si se instalara el detector junto al Gran Cañón, apuntando hacia el desfiladero y registrando los datos sólo en las noches nubladas. Pero esa estrategia apenas reduciría la luz de fondo en un factor de diez. Por no decir que resultaría poco menos que ineficaz pedir a los excursionistas que se abstuvieran de encender fuegos de campamento durante varios años. Sí podría pensarse en colocar el detector de ojo de mosca en una gran cueva o en una mina de sal, del estilo de las que se están aprovechando para detectar la desintegración del protón.

Hay en proyecto otro detector de enormes proporciones: el DUMAND (del inglés *d*eep *u*nderwater *m*uon and *n*eutrino *d*etector, "detector de muones y neutrinos instalado a gran profundidad marina"). El DUMAND posee sensibilidad suficiente para registrar los acontecimientos que se desarrollen en el interior de un cubo de océano de un kilómetro de lado (véase "Un telescopio de neutrinos en las profundidades marinas", por John G. Learned y David Eichler; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1981). Ese dispositivo submarino se mostrará sensible a la radiación Cerenkov, emitida cuando se mueva una partícula por el agua a una velocidad superior a la de la luz en ese medio. Por desgracia, los monopolos magnéticos superpesados se moverán con lentitud excesiva para emitir radiación de Cerenkov.

Algunos de los mayores detectores de centelleo que existen, pensemos en los macrodetectores de neutrinos del Fermilab y el CERN, resultan demasiado pequeños, hasta en un factor de 100 casi, para que podamos confiar en que





MONOPOLOS ATRAPADOS en la tierra. Tenderían a congregarse en dos sitios del núcleo terrestre. De acuerdo con los cálculos realizados por Richard A. Carrigan (uno de los autores de este artículo), los puntos de equilibrio donde las poblaciones de monopolos magnéticos mostrarían mayor densidad se hallarían a menos de 1600 kilómetros del centro de la tierra. Los monopolos norte se irían acumulando en las proximidades del polo sur geomagnético, y viceversa (*a la izquierda*). Debido a la reiterada inversión del campo geomagnético (fenómeno del que da testimonio el registro terrestre), las dos poblaciones de monopolos separadas emigrarían la una al encuentro de la otra (*derecha*). Habría pares de monopolos norte y sur que chocarían, se aniquilarían y su masa se convertiría en energía. Hasta una mínima densidad de monopolos superpesados contribuiría, de forma destacada, a que fluyera calor hacia la superficie terrestre. El flujo de calor observado establece así un límite en el número de monopolos que podrían subyacer atrapados de este modo.

registren monopolos magnéticos si es verdad que el flujo está limitado por el campo magnético galáctico. Pero podría ser provechoso ponerlos a buscar monopolos en los intervalos de tiempo en que el acelerador está parado por falta de trabajo, habida cuenta de que no están bien definidos los límites experimentales para partículas superpesadas que se mueven con lentitud. Jack D. Ullman, del Lehman College neoyorquino, acaba de concluir una búsqueda provisional, en la que ha empleado un detector de medio metro cuadrado que ha estado en funcionamiento varios meses, convirtiéndose en el único límite experimental obtenido hasta la fecha. Los experimentos definitivos tendrán que poseer una sensibilidad 10.000 veces superior.

La opinión contraria sostiene que toda búsqueda mediante detectores de ionización se halla condenada al fracaso, por la sencilla razón de que los monopolos superpesados que avanzan lentos no producen ionización. Pero lo cierto es que el paso de cualquier partícula cargada a través de un metal viene acompañado por corrientes de torbellino, con independencia de la velocidad que lleve la partícula y de si su carga es eléctrica o magnética. Se espera que las corrientes de torbellino creen pulsos acústicos, susceptibles de ser detectados. Carl W. Akerlof, de la Universidad de Michigan, ha sometido a comprobación la posibilidad de construir un detector metálico esférico, en línea con este razonamiento. Y ha llegado a la conclusión de que podría detectarse la señal sobre el fondo de ruido térmico en el caso único de que enfriáramos el detector hasta miligrados por encima del cero absoluto. Una exigencia técnica que se complica con otra necesidad: la de construir un detector lo bastante grande para que responda al lento flujo de monopolos que se espera.

Otra estrategia, más sencilla en comparación, es la fundada en una bobina superconductora parecida a la empleada por el equipo de Alvarez. El detector en cuestión se conoce por SQUID (del inglés *s*uperconducting *q*uantum *i*nterference *d*evice, "aparato superconductor para interferencias cuánticas"). Registra los cambios acontecidos en una corriente eléctrica cuando la atraviesa un monopolo libre procedente de la radiación cósmica. Blas Cabrera, de la Universidad de Stanford, trabaja en la búsqueda de monopolos con una bobina superconductora de niobio de cinco centímetros de diámetro. Pero el físico español lleva entre manos también otro experimento de detección de esas partículas. En éste, se hincha un saco cilíndrico de plomo, superconductor, de un metro de longitud por 20 centímetros de diámetro, expulsando la mayor parte del flujo magnético atrapado. Si penetra un monopolo magnético dentro del saco, dejará atrapado flujo magnético en las zonas de la pared por donde haya entrado y salido. Cartografiando periódicamente el magnetismo del saco, las diferencias que surjan en la distribución del flujo se atribuirán al paso de un monopolo. Si se detecta una de éstos, tendremos entonces información aproximada de su dirección.

Asimismo, David B. Cline, del Fermilab y la Universidad de Wisconsin, y Carlo Rubbia, del CERN y Harvard, se han aplicado al tema de los monopolos. Y acaban de incoar un ambicioso plan para la detección de monopolos. Pretenden montar un detector superconductor bajo una fábrica de tratamiento de mineral de hierro en el estado de Wisconsin. La planta calienta más de un millón de toneladas de material al año, hasta una temperatura de 1700 grados Celsius. Temperatura a la que se liberaría cualquier monopolo magnético que se hallara atrapado en el hierro, para caer por el detector.

La historia que ha recorrido la hipótesis de los monopolos magnéticos no tiene par en ningún otro campo de la física. Iniciada hace medio siglo por uno de los gigantes de la física moderna, la caza del monopolo se convirtió en terreno abonado para la especulación teórica sin conocer, hasta la fecha, refrendo alguno experimental. Y dar con él sería, sin duda, uno de los mayores triunfos de nuestro siglo, comparable con el descubrimiento del positrón, otra partícula cuya existencia predijo también Dirac. Si resultara que el monopolo posee en realidad una masa enorme, la defensa de alguna forma de teoría de gran unificación de las interacciones entre partículas elementales quedaría vigorosamente robustecida.

En el caso, más verosímil, de que sigan los monopolos sin dejarse ver, la prueba negativa no se aceptará como determinante. Los experimentos involucrados serán difíciles, y aun cuando se desarrollen con todas las garantías, un resultado nulo no aclarará demasiado la situación. Mas la justificación definitiva de la hipótesis de los monopolos descansa en esas búsquedas, pues no hay que olvidar que la física es, en su análisis postrero, una ciencia experimental.

Cromatina y ensamblaje del virus SV 40

Las formas nucleoproteicas de este virus oncogénico constituyen unos modelos sencillos para interpretar la organización y función del material hereditario

Miguel Coca Prados

El material constituyente de los cromosomas se llama cromatina; consta de ácido desoxirribonucleico (ADN) y proteína. La biología celular ha invertido muchos años y no pocos esfuerzos en el desciframiento de uno de sus misterios fundamentales: ¿Cómo se organiza la cromatina en los organismos superiores? Cuestión que puede desdoblarse en otros dos interrogantes: ¿Cómo se organiza el ADN de una célula, formado por unos 5×10^9 pares de bases, en un núcleo que apenas mide unos cuantos micrometros de diámetro, y consigue un nivel de organización estable en el cromosoma metafásico? ¿Cómo se relaciona la estructura y organización de la cromatina con el control de la transcripción de un genoma complicado, capaz de codificar cientos de miles de genes? El tesón y el tiempo invertidos no han resultado en vano. Sabemos ya que el nucleosoma, unidad fundamental de la estructura de los cromosomas, es una superficie de ADN devanada sobre una canilla constituida por proteínas histonas (véase "El nucleosoma", por Roger D. Kornberg y Aaron Klug; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1981).

Pero hay otra vía de aproximación al tema: escoger una estructura más sencilla, la de un virus. Nuestra investigación va a centrarse justamente en la cromatina y ensamblaje del virus del mono, SV 40. Descubierto en las células de riñón de ese primate, en 1960, es oncogénico y altera los cultivos celulares. El genoma de SV 40 consta de una doble hélice de ADN, en formación circular, cerrada por enlaces covalentes. Tiene un peso molecular de $3,5 \times 10^6$ con 5200 pares de bases. El material hereditario supone el 12 por ciento de su peso; el 88 restante es proteína. Carece de lípidos e hidratos de carbono. Mide de 400 a 450 angstrom de diámetro y contiene 72 capsómeros en su cápside, cubierta protectora que es de tipo icosaédrico.

Los virus poseen una capacidad genética limitada. Necesitan de la maquinaria metabólica de la célula que infectan para acometer sus propios procesos fundamentales: replicación vírica, transcripción y procesamiento del ácido ribonucleico (ARN) y síntesis de proteínas víricas. El descubrimiento de los enzimas de restricción permitió romper un ácido nucleico en fragmentos más pequeños y localizar la posición relativa de un gen en la secuencia de bases de ADN. En el caso de SV 40, sabemos, por ejemplo, que el ADN está formado por dos regiones: una temprana, que se expresa durante las primeras horas de infección, y otra tardía, que contiene los genes que codifican la síntesis de las proteínas estructurales de la cápside.

Hay varias razones que abonan la importancia del estudio de la cromatina y ensamblaje del SV 40. En primer lugar, las propiedades de la cromatina vírica y las vías de síntesis de macromoléculas se asimilan estrechamente a las del huésped. En segundo lugar, la cromatina de SV 40 puede purificarse a partir de las células que infectó, libres de contaminación de cromatina celular, al objeto de obtener una población homogénea de ADN con una estructura genética simple. Por último, los procesos reguladores de la transcripción, en el genoma de SV 40, están muy simplificados, al existir sólo dos unidades de transcripción y una unidad de replicación. Otras ventajas que pudieran citarse tienen que ver con nuestro mayor conocimiento y capacidad de manipulación del virus. No sólo se ha cartografiado la secuencia de pares de bases que constituyen su ADN, se dispone también de métodos para inducir mutantes en puntos concretos de dicha secuencia. Sin olvidar que la encapsidación de la cromatina dentro del virus representa un buen modelo para estudiar la cromatina a un nivel de organización superior.

En el laboratorio del profesor James E. Darnell, en la neoyorquina Universidad Rockefeller, él y yo hemos aislado y caracterizado varias formas de cromatinas víricas o complejos nucleoproteicos, a partir de células que antes habían infectado, y posteriormente destruido, el virus SV 40. En esos estudios nos proponíamos desarrollar un método de purificación de cromatina de SV 40, que se mostrara activa en el proceso de transcripción, e identificar así sus propiedades bioquímicas. Y, a modo de complemento, caso de que fuera posible, descubrir el proceso de condensación de la cromatina vírica y el de la formación de cápsides, o cubiertas proteicas.

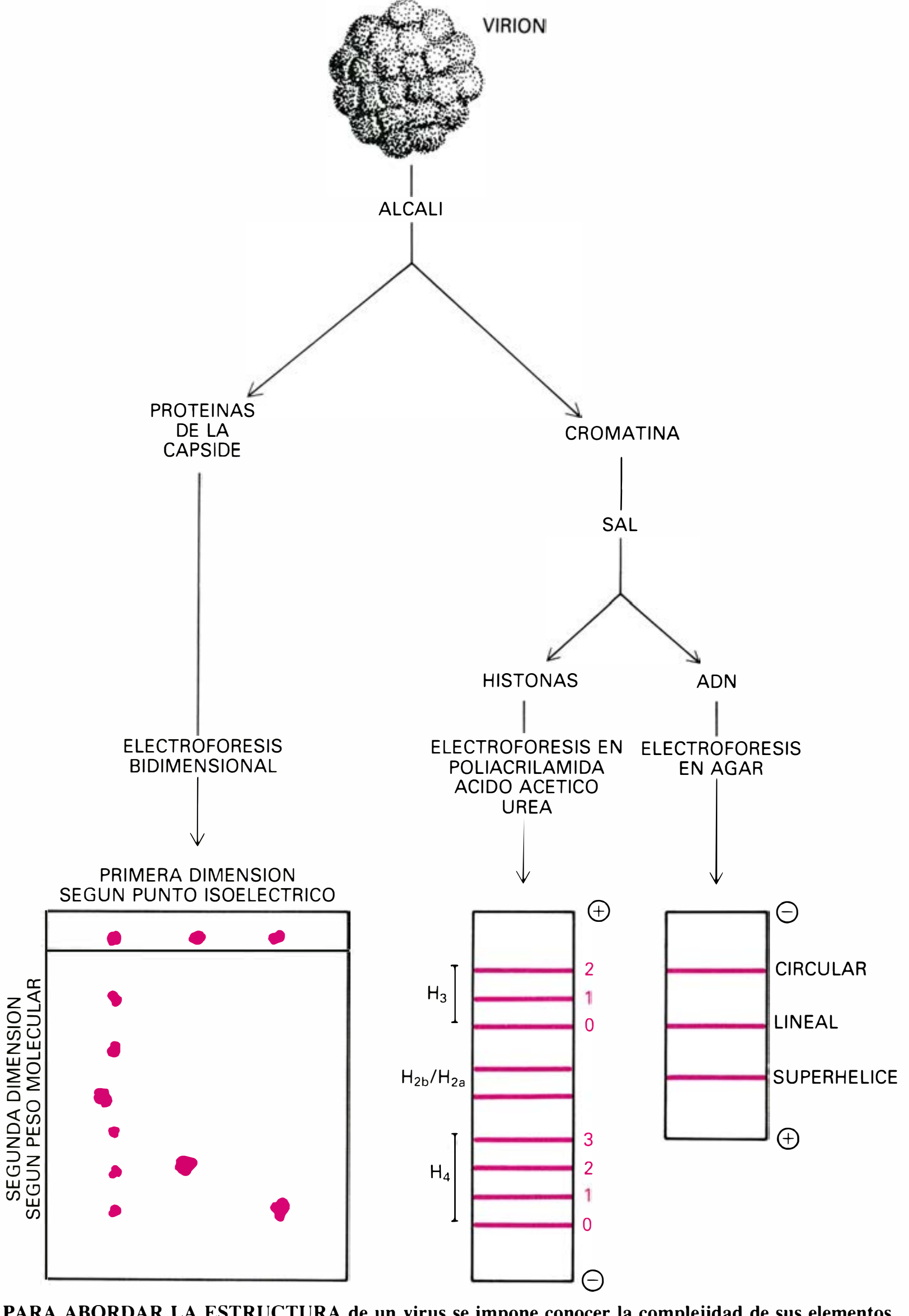
¿Cómo se aborda la estructura de un virus? Disociando sus componentes de acuerdo con su peculiaridad química y funcional. Para ello se siguen unos métodos de rotura que se han convertido ya en clásicos en los laboratorios bioquímicos. Los métodos pueden ser químicos (detergentes, mercaptoetanol, urea y álcalis) o físicos (calor). El virus

VIRUS DEL MONO, SV 40, en las microfotografías de la página opuesta. Descubierto en las células de riñón de ese primate, en 1960, el virus del mono es oncogénico y altera los cultivos celulares. Su genoma consta de una doble hélice de ADN, en formación circular, cerrada por enlaces covalentes (*microfotografía superior derecha*); la doble hélice se retuerce a veces sobre sí misma para constituir una superficie. Mide de 400 a 450 angstrom de diámetro y contiene 72 capsómeros en su cápside, cubierta protectora, que es de tipo icosaédrico (*arriba, a la izquierda*). La microfotografía inferior recoge virus sombreados unidireccionalmente con paladio-platino. Microfotografías obtenidas con la colaboración de Ming Ta Hsu.

se disocia así en sus componentes: ácido nucleico y proteínas. Uno y otras se analizan de acuerdo con una serie de métodos de separación de macromoléculas, que se resumen, fundamentalmente, en dos: ultracentrifugación y electroforesis; aquélla se funda en la fuerza de la gravedad, ésta en las cargas electrostáticas y en el peso molecular. No sólo discriminan entre un tipo y otro de macromoléculas, sino también entre macromoléculas de una misma clase. En geles de poliacrilamida que contengan urea y ácido acético, pueden separarse las distintas formas o subgrupos de una histona en particular, según las cargas positivas que haya en la cadena polipeptítica que la configura.

El ADN del virus es una doble hélice circular retorcida sobre sí misma (superhélice). Se llama densidad de hélice al número de vueltas en que se retuerce el ácido desoxirribonucleico. En el caso de SV 40, la densidad de hélice es de 21 vueltas.

El virus contiene tres proteínas estructurales, VP 1, VP 2 y VP 3, de pesos moleculares 47.000, 29.000 y 25.000, respectivamente. Las proteínas VP 1 y VP 2 forman parte de los capsómeros, unidades estructurales que constituyen la cápside. Aunque no se conozca de una manera precisa cuál sea la exacta localización de la tercera proteína, VP 3, se la supone en asociación parcial con el ADN vírico. Los análisis de la principal proteína de la cápside (VP 1), que representa el 70 por ciento del total proteico de SV 40, mediante electroforesis bidimensionales han revelado que no se trata de una proteína homogénea, sino que contiene, además, otras cinco proteínas "satélite", o formas modificadas. Por hallarse altamente fosforiladas, se ha llegado a sugerir que entre las proteínas víricas pudiera haber un enzima kinasa, y que dicha actividad enzimática sería necesaria durante el proceso de formación de la cápside.

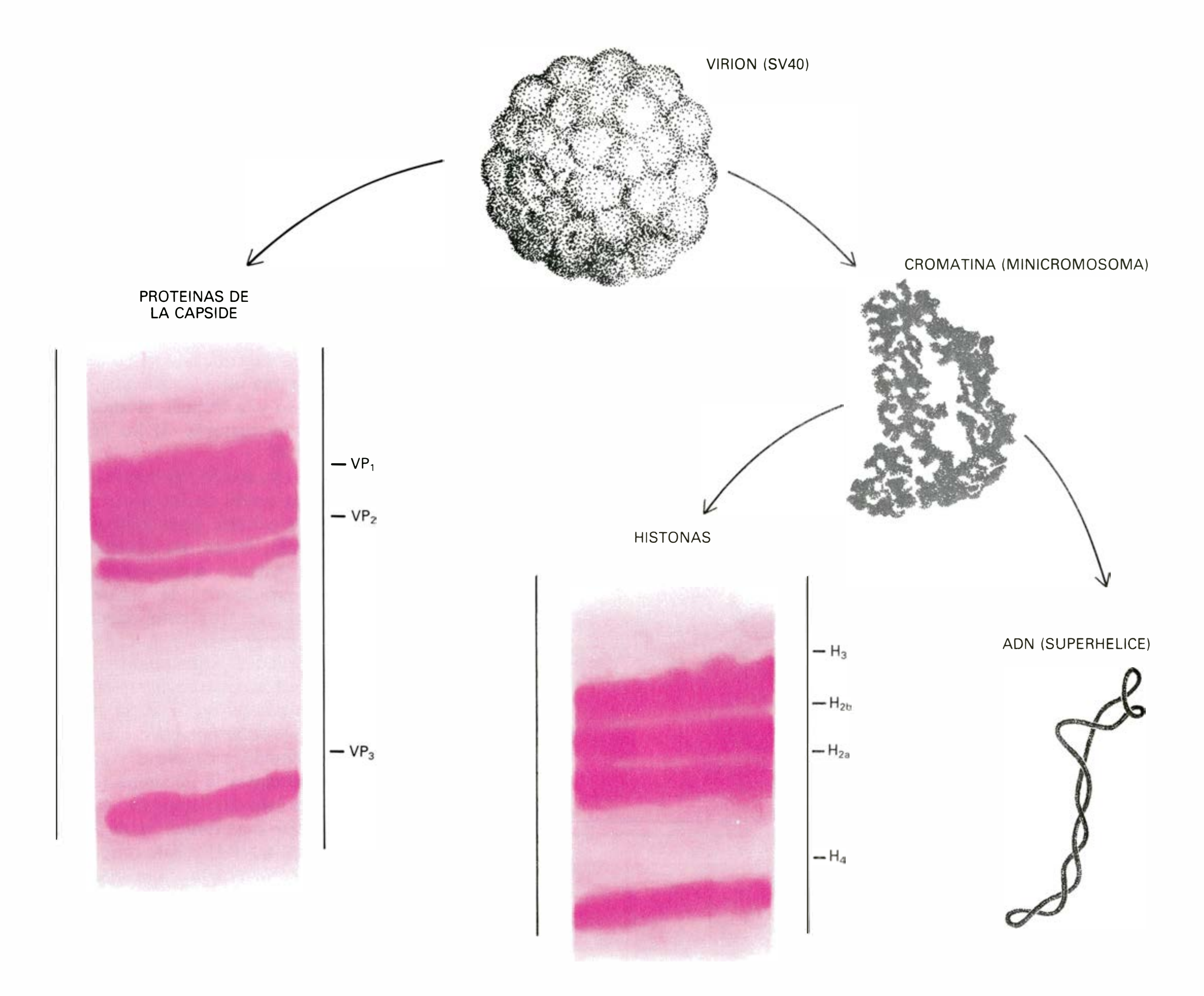


PARA ABORDAR LA ESTRUCTURA de un virus se impone conocer la complejidad de sus elementos componentes, tras su disociación por procedimientos químicos o físicos. Una vez disociado el virus en sus elementos componentes (proteínas y ácido nucleico), se analizan éstos por métodos de separación de macromoléculas. La resolución llega a distinguir entre formas diferentes de una misma clase de macromoléculas, según sus cargas electrostáticas, como en el caso de las histonas en condiciones ácidas. Las proteínas de la cápside son VP 1 y VP 2. Una tercera proteína estructural, VP 3, se la supone parcialmente asociada al ADN del virus. Con éste forman unión las proteínas histonas, su otro grupo proteínico.

Además de las proteínas de la cápside y de la VP 3, en los complejos nucleoproteicos extraídos de los núcleos de las células infectadas hallamos histonas, de origen celular, asociadas al ADN vírico. Dicha asociación ADN-histonas permite una condensación del ADN que viene a triplicar la que se da en el ADN desproteinizado en las formas carentes de cápside. En los viriones (virus maduros), la interacción ADN-histona se refleja en una mayor condensación de la cromatina, de hasta siete veces la del ADN desproteinizado, lo que da idea del proceso dinámico del mecanismo de encapsidación. Las interacciones electrostáticas, entre las regiones de carga positiva en la cadena polipeptídica y las cargas negativas de los fosfatos en el ADN, provocan múltiples alteraciones físicas y bioquímicas en las moléculas histónicas. Cambios que controla la célula. La estructura de la cromatina y síntesis de ADN y ARN del virus SV 40 guardan un estrecho parecido con sus homólogas de los organismos superiores. Como en una célula eucariota, el ADN de una partícula vírica forma, con las histonas del huésped, nucleosomas.

¿Cuál es el ciclo biológico de multiplicación de un virus SV 40 en el seno de una célula animal a la que ha infectado líticamente? El ciclo completo dura 48 horas. En el intervalo de las primeras horas (de 1 a 8) de la infección se suceden una serie de acontecimientos en el citoplasma celular, no desvelados del todo, que terminan por desorganizar la cápside del virus y transportar la nucleoproteína resultante (ADN-histonas) hacia el núcleo celular.

A lo largo de las cuatro horas siguientes (de 8 a 12 horas tras la infección), el ADN del virus comienza a transcribir la mitad de su genoma, la así



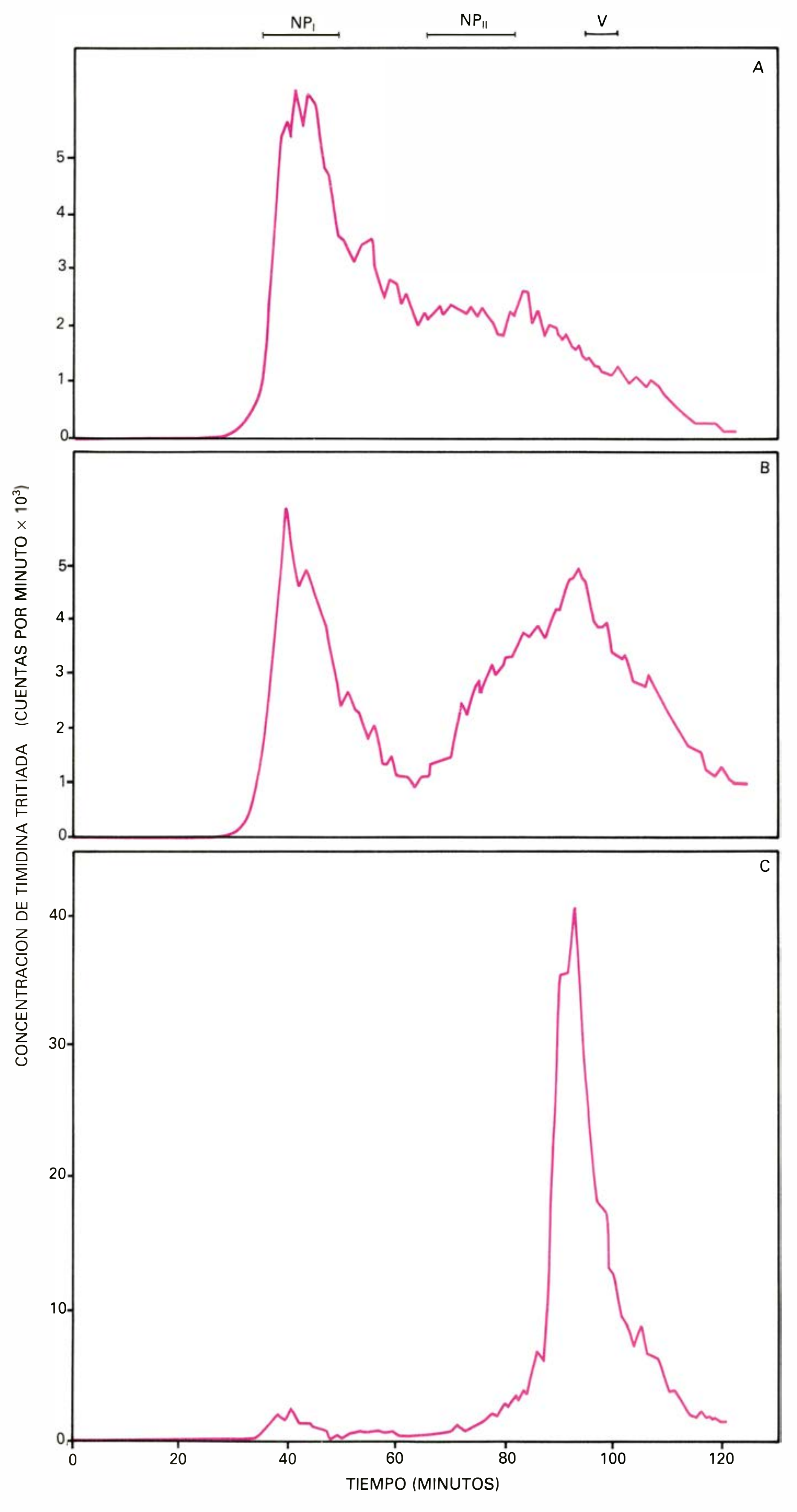
ADN Y PROTEINAS DEL VIRUS SV 40. El ADN del virus es una doble hélice circular retorcida sobre sí misma (superhélice, *abajo a la derecha*). Se llama densidad de hélice al número de vueltas en que se retuerce el ácido desoxirribonucleico, que, en el caso del SV 40, es de 21 vueltas. El virus contiene tres proteínas estructurales: VP 1, VP 2 y VP 3, de pesos moleculares 47.000, 29.000 y 25.000, respectivamente (*a la izquierda*). Además de ls proteínas de la cápside (la VP 1 y la VP 2) y de la VP 3, en los complejos nucleoproteicos extraídos de células infectadas se han hallado histonas (*abajo, en el centro*) asociadas al ADN vírico. En los viriones (*arriba*), que son virus que han alcanzado la madurez, la interacción ADN-histona se refleja en una mayor condensación de la cromatina, de hasta siete veces la del ADN desproteinizado. Se llama cromatina al material constituyente de los cromosomas.

llamada región temprana. Se sintetiza ARN nuclear (E-ARN) y ARN mensajero (E-ARNm), que se traducirán en dos tipos de proteínas: los antígenos *T* y los antígenos *t*. De los dos, el antígeno *T* es el responsable de la transformación patogénica que ocurre en determinadas células de mamíferos cuando se les infecta con virus SV 40. Se le han atribuido, además, varias propiedades reguladoras: síntesis de factores celulares (Fc), que estimulan la formación de ADN celular y, por tanto, de proteínas celulares (histonas, por ejemplo); autorregulación de su propia síntesis, bloqueando el proceso metabólico de formación de E-ARN vírico; y, por último, inducción del comienzo de la replicación del ADN vírico, con intervención de determinados factores celulares (enzimas). La síntesis de ADN del virus avanza bidireccionalmente y en forma discontinua. No sabemos todavía en qué estriba la función del otro antígeno, el *t*.

La replicación del ADN vírico acontece entre 12 y 15 horas de iniciada la infección. Coincide con el comienzo de la expresión genética de la región tardía del virus, que codifica la síntesis de las proteínas estructurales de la cápside (VP 1, VP 2 y VP 3). En el período que transcurre desde las 12 horas hasta el final del ciclo tiene lugar la encapsidación de las nucleoproteínas para formar el virión. Las histonas que se sintetizan (de origen celular) se unen de un modo preferente con las moléculas de ADN vírico que se están replicando. Según parece, se guarda cierto orden en la asociación: primero se enlazan H3 y H4 y, luego, H2a y H2b. Cabe presumir que la proteína histona H1 se asocie a la proteína antes de que se replique el ADN vírico.

Las formas nucleoproteicas de SV 40 en esta fase tardía de infección corresponden a las formas NP I (en fase de replicación), NP II (en vías de encapsidación) y viriones (alcance de la fase de madurez por el virus en formación). Antes de llegarse a esta última fase, de la cromatina vírica se libera la proteína histona H 1.

Hemos desarrollado un nuevo procedimiento de extracción de complejos nucleoproteicos de SV 40. El método en cuestión se funda en un tratamiento hipotónico de las células infectadas, a las 48 horas del ataque vírico, seguido de una suave homogenización de los núcleos celulares en condi-



PERFILES DE SEDIMENTACION de las formas nucleoproteicas de SV 40, en gradientes de sacarosa. En los tres gráficos aparece la cinética de incorporación de timidina tritiada en las nucleoproteínas NP I y NP II y en el virión, respectivamente (*de arriba abajo*). En *A* basta un pulso de 30 minutos para detectar la mayoría de la radiactividad incorporada en la nucleoproteína NP I; ahora bien, si este pulso se incrementa hasta 90 minutos (*esquema central*) o 24 horas (*gráfico inferior*) se observa una acumulación progresiva de radiactividad en el virión. El tiempo límite de incorporación de timidina tritiada en los cultivos de células infectadas fue, en los tres casos reseñados, a las 48 horas de transcurrido el ataque vírico.

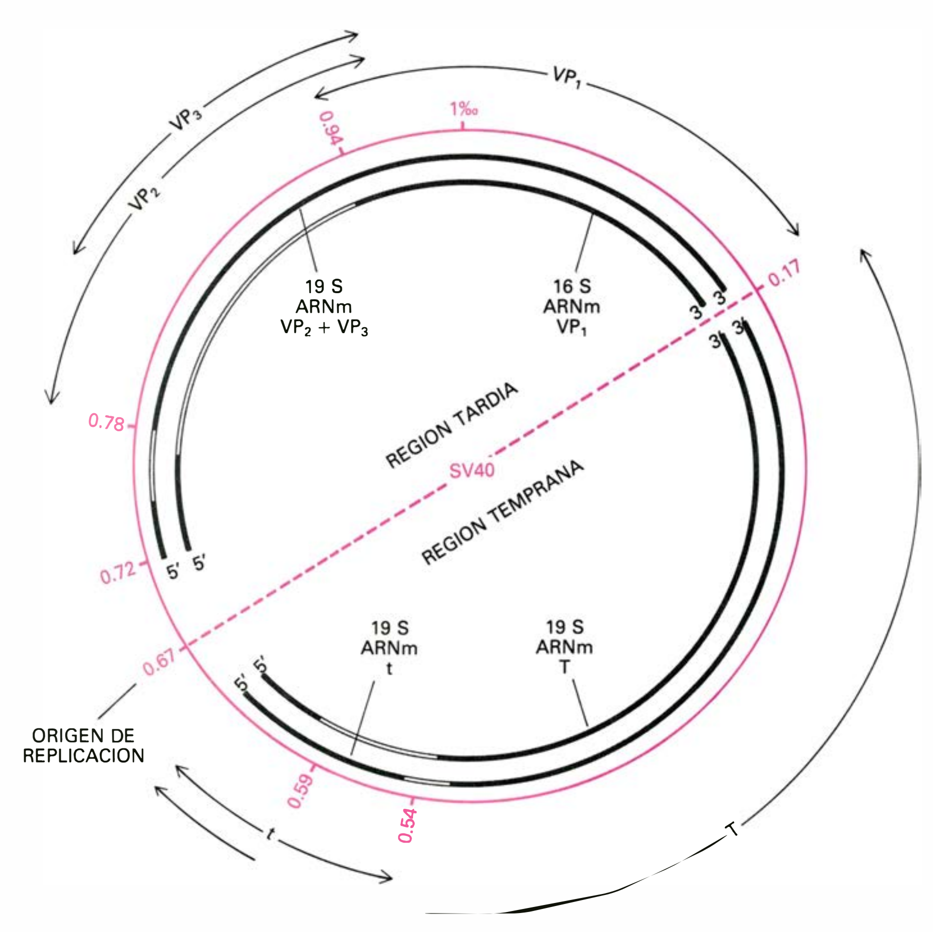
ciones isotónicas. (Una solución es hipotónica cuando ocurre por debajo de la presión osmótica de uno de los reaccionantes e isotónica cuando ambos se hallan a la misma presión.)

Nuestro procedimiento nos permite aislar tres formas bien diferenciadas de cromatina vírica, o nucleoproteína. Mientras que el método tradicional emplea un detergente (Triton) que destruye todas las formas intracelulares del virus y las convierte en una fracción única de 60-70 *S* (*S* abrevia la unidad Svedberg, que expresa la tasa de sedimentación en una ultracentrífuga y depende del peso y la forma), el nuestro mantiene las estructuras de los complejos de SV 40.

Durante la extracción, las nucleoproteínas salen a través de los poros nucleares de las células. Esas formas se pueden separar, luego, en gradientes diferenciales. Cuando se analizan, por ejemplo en gradientes de sacarosa, pueden recabarse tres componentes: NP I, NP II y viriones.

Las propiedades fisicoquímicas de las nucleoproteínas se recogen en el cuadro de la página 86. Vale la pena detenerse en las más notables. Los experimentos llamados de pulso y caza, en los que se marca la nucleoproteína con timidina tritiada, sugieren el siguiente proceso metabólico: la nucleoproteína I pasa a NP II y ésta se resuelve en el virión completo. Si se operan sólo breves pulsos con timidina tritiada, únicamente NP I queda marcada radiactivamente. Si el proceso de caza con timidina no radiactiva dura una hora, el marcado aparece en la región donde sedimenta NP II. Un marcado continuo, por pulsos de 12 horas, nos pone de manifiesto que la mayoría del marcado se concentra en NP II y viriones. Este resultado de marcado radiactivo en NP II es muy rápido (30 minutos), en tanto que ha de transcurrir una hora de marcado continuo con pulsos para que el virión quede radiactivamente afectado. Ahora bien, como el tiempo requerido para que se complete un ciclo de replicación del ADN es de 10 a 15 minutos, este resultado implica que NP I se convierte en NP II al poco de la replicación del genoma vírico.

Una segunda propiedad a destacar es que el NP I representa una fracción pequeña entre todas las formas nucleoproteicas de SV 40 extraídas. La tercera propiedad se refiere a la estructura nucleosómica de la cromatina. La estructura de nucleosoma en la forma nucleoproteica NP I queda patente en los experimentos realizados con enzi-



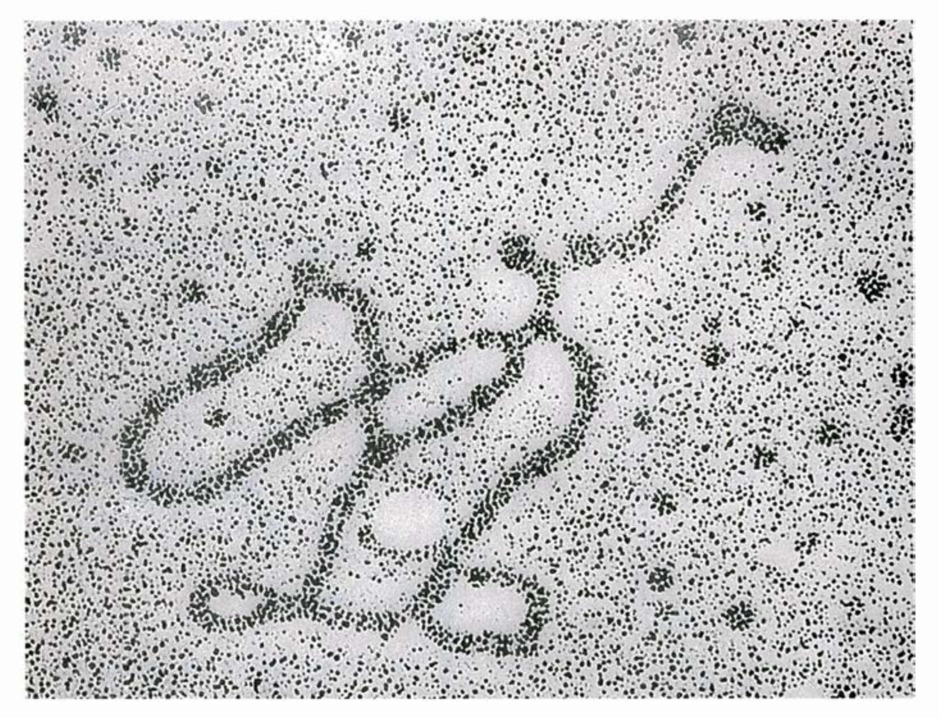
MAPA GENETICO DEL VIRUS SV 40, en representación esquemática. Se ha dividido el mapa en 100 unidades. La unidad 1.0/0.0 se toma como punto de referencia, significando el lugar donde el enzima de restricción *E. coli R1* ataca el ADN del virus. La región del genoma que se expresa en las primeras 12 horas de ocurrida la infección (región temprana) abarca desde el origen de replicación, 0.67, a la coordenada 0.17 (en el sentido contrario al movimiento de las agujas del reloj). Los ARNm se señalan en zigzag, indicando con línea sin tramar la región del ARN nuclear que se rompe y luego vuelve a unirse ("splicing"). La región tardía del genoma se expresa después de replicarse el ADN vírico. Comprende de 0.67 a 0.17 en el sentido de las agujas del reloj. Se indican en zigzag los ARNm que se transcriben, así como las proteínas que se traducen. Las zonas sin tramar tienen el mismo significado que en la región temprana.

mas nucleasas, que atacan las regiones de ADN de la cromatina menos protegidas. En NP II, al estar la cromatina muy condensada, su estructura nucleosómica queda más velada al microscopio electrónico, pero los análisis enzimáticos atestiguan esa configuración. La nucleasa de *Micrococcus* rompe el ADN en fragmentos de unos 150 pares de bases, resistentes a la acción del enzima, que contienen un octámero de proteínas histonas típicos de los nucleosomas de las células eucariotas.

Parece perfectamente asentada la idea del nucleosoma como subunidad básica de la cromatina celular. Consta de un núcleo con cuatro dímeros de proteínas histonas: $(H2a)_2$, $(H2b)_2$, $(H3)_2$ y $(H4)_2$; el núcleo está asociado a un fragmento de ADN que contiene 150 pares de bases. La distancia de nucleosoma a nucleosoma varía de acuerdo con el origen de la cromatina. La histona H1 se localiza en el espacio internucleosómico.

Cuando se trata de estudiar la accesibilidad del enzima ADNasa de páncreas a las formas mencionadas de cromatina vírica, se observa que NP II es más resistente que NP I, lo que resulta verosímil en la hipótesis de que NP I represente la forma activa del virus del simio SV 40. Por los experimentos de pulso y caza efectuados con lisina tritiada sabemos que las histonas que se sintetizan a raíz de la estimulación del ADN celular durante el proceso infectivo se asocian a ADN vírico, que, a su vez, se halla en fase de replicación. Ahora bien, puesto que NP I es la forma activa con propiedades de replicación, el análisis del contenido proteico revela la presencia de las cinco clases de histonas, junto con trazas de una proteína de la cápside del virus, la VP 1 (de cuya presencia se desconoce el motivo).

Tampoco se ha desvelado la función de NP II, ni el proceso que controla la conversión de NP I en NP II, proceso que comporta un cambio de conformación (NP II sufre una condensación



MOLECULA DE ADN del SV 40, en fase de transcripción. La flecha de trazo recto señala la cadena de ARN; la flecha en codo, el enzima ARN polimerasa. La molécula se obtuvo tras tratamiento de núcleos de células infectadas con SV 40, a las 48 horas tras la infección, con formamida al 70 por ciento.

profunda) y una suspensión de las actividades biosintéticas. NP II contiene las mismas histonas que NP I, más las proteínas víricas VP 1, VP 2 y VP 3; representa, asimismo, formas intermedias de encapsidación.

El virión es la forma madura encapsidada. Resiste la disociación ante concentraciones altas de salinidad. (NP I y NP II, por contra, se disocian en ADN y proteínas bajo esas mismas condiciones.) Si analizamos las proteínas que poseen los viriones, quedaremos sorprendidos por la ausencia de la histona H1. ¿A qué obedece esa única excepción? Quizás ocurra que durante la infección del virus, éste pierde su cápside, asociándose entonces H1 a la cromatina vírica, para liberarse a lo largo del proceso de ensamblaje del virus.

Las histonas presentes en las distintas formas nucleoproteicas de SV 40 experimentan cambios dinámicos, es decir, modificaciones de tipo bioquímico, como acetilación, fosforilación, metilación y poli-ADP ribosilación. El significado biológico de esas modificaciones que sufren las histonas no se ha logrado poner de manifiesto todavía. Hay abundantes observaciones que atestiguan que la acetilación de las histonas, por ejemplo, precede al proceso de transcripción. Pero no hay pruebas directas que atestiguen ninguna función en la regulación de un gen específico. En el curso del proceso NP I → NP II → virión, las histonas, tras su síntesis, se asocian a las formas nucleoproteicas NP I del virus, y éstas sufren cambios dinámicos como consecuencia de las modificaciones bioquímicas reseñadas.

	NP-I	NP-II	VIRION
Coeficiente de sedimentación en gradiente de sacarosa	70 *S*	180 *S*	210 *S*
Densidad en ClCs con glutaraldehído (gr/ml)	1,45	1,35	1,35
Densidad en metrizamida (gr/ml)	1,18	1,18	1,26
Morfología al M.E.	Fibra circular de 100 Å	Fibra condensada	Virión
Actividad de Replicación *in vivo* e *in vitro*	Sí	No	No
Actividad de Transcripción *in vivo* e *in vitro*	Sí	No	No
Transcripción del ADN con ARN Polimerasa de *E. coli*	Sí	No	No
Configuración del ADN	Superhélice con 21 vueltas	Superhélice con 21 vueltas	Superhélice con 21 vueltas
Digestión con nucleasa de *Micrococcus*	Origina Nucleosomas	Origina Nucleosomas	Resistente
Histona H1	Sí	Sí	No
Histona H2a, H2b	Sí	Sí	Sí
Histonas H3, H4	Sí	Sí	Sí
Proteína Vírica VP1	?	Sí	Sí
Proteína Vírica VP2	?	Sí	Sí
Proteína Vírica VP3	Sí	Sí	Sí

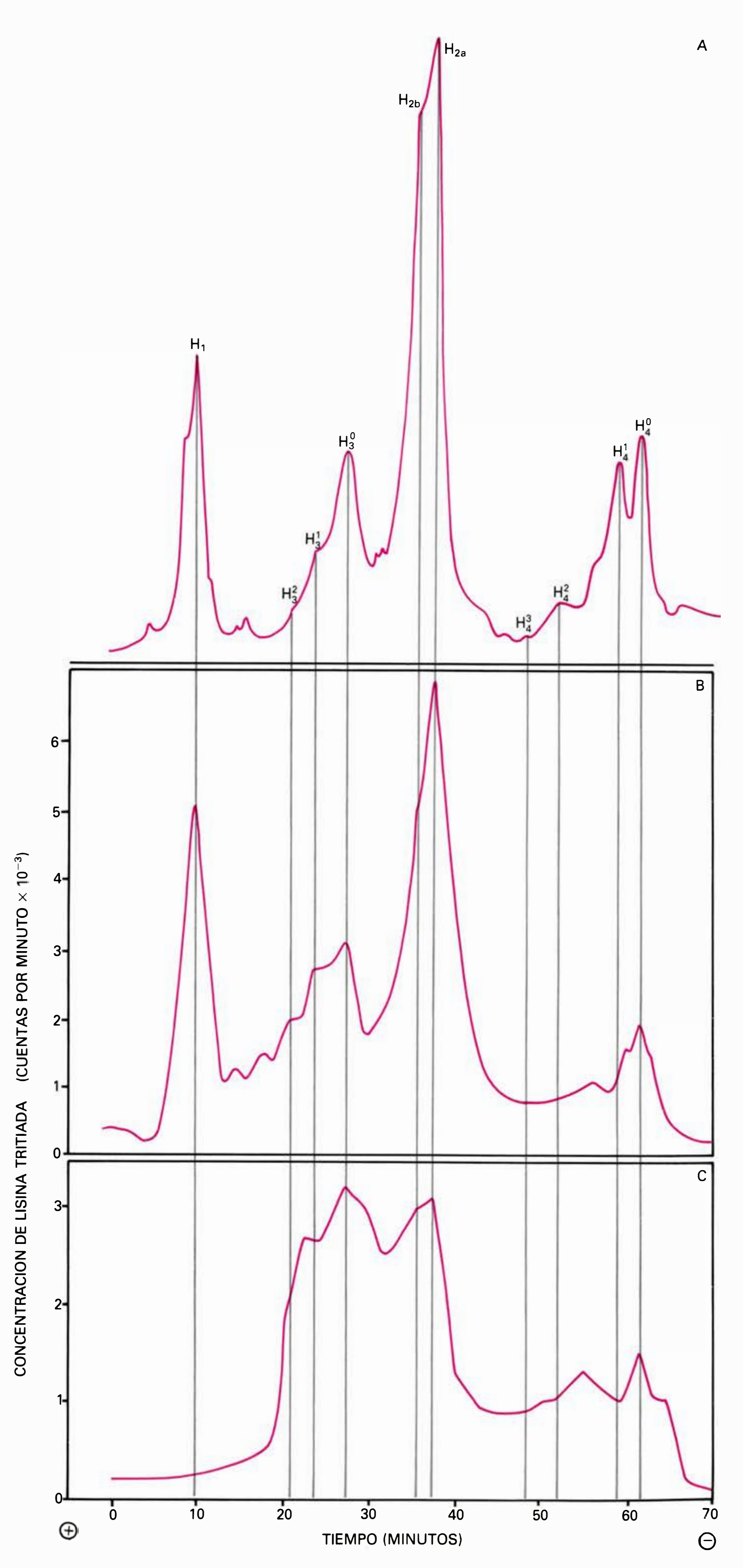
PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS de los complejos nucleoproteicos de SV 40. La nucleoproteína NP I pasa a NP II y ésta se resuelve en el virión, o virus que ha alcanzado su fase de plena madurez.

Aunque el tipo de modificación que sufren las histonas en NP I se asemeja al que se registra en la cromatina celular, y difiere a su vez de las que padece NP II y el virión, se desconoce también el significado biológico de las mismas. En SV 40 pueden suponer una interacción eficiente entre la cromatina y las proteínas de la cápside durante el mecanismo de ensamblaje del virus. En otros casos se ha encontrado que la acetilación de las histonas es el preludio de actividades de transcripción. Cabe presumir que tales diferencias en el tipo de modificación respondan a diferencias funcionales en la cromatina vírica y en la celular.

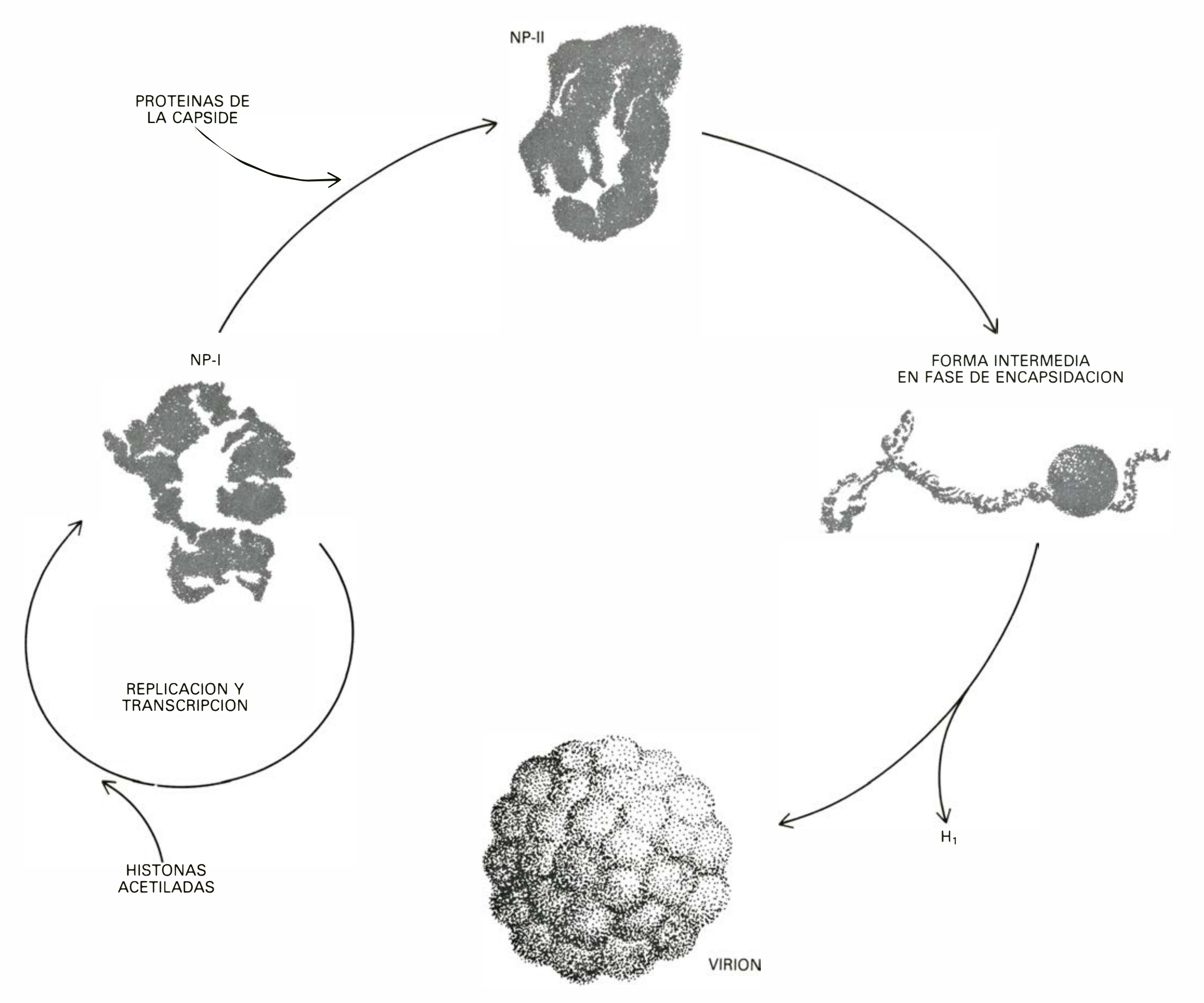
En la cromatina celular encontramos, además de histonas, proteínas no histónicas, específicas del tipo de tejido celular. Se cree que contienen factores que regulan actividades específicas de los genes. Figuran, entre éstos, los enzimas polimerasas responsables de la síntesis de ADN y ARN, otros enzimas que tienen por misión modificar ciertas proteínas nucleares, receptores de hormonas, y factores que estimulan o inhiben el proceso de transcripción. Una clase de esas proteínas no histónicas, las así llamadas abreviadamente HMG (del inglés "high molecular group", es decir, grupo de elevado peso molecular), se están convirtiendo en foco de atención para los bioquímicos. Se han encontrado proteínas de naturaleza similar en *Escherichia coli*, una enterobacteria. Asimismo, se han encontrado trazas de tales proteínas.

Llegamos así a la maduración del virus del simio SV 40. Nuestro modelo de ensamblaje se basa en datos experimentales y en observaciones al microscopio electrónico. Consiste ese ensamblaje en la adición gradual de las proteínas de la cápside en la cromatina vírica, con la organización subsiguiente de la nucleocápside en una estructura resistente a concentraciones altas de sales. Para ello habrá que dar respuesta antes a dos dificultades con que se encuentra el modelo: el origen de las cápsides vacías y la ausencia de la proteína histona H1 del virión.

Las investigaciones de Ozer y Tegtmeyer sugerían que las proteínas de la cápside formaban primero una estructura hueca (la cápside propiamente dicha), donde se introducía luego el genoma vírico. Pero se sabe ya que el procedimiento que estos autores usaron en sus análisis, gradientes de cloruro de cesio, disocia muchas de las formas nucleoproteicas víricas. No está claro, pues, si las entidades observadas en gradientes de cloruro de cesio son formas que se sintetizan independientemente, si surgen como consecuencia del efecto disociador del cloruro césico o bien se trata de formas intermedias del ensamblaje de la cromatina de SV 40. Tales estructuras (cápsides vacías) se observan raramente al microscopio electrónico cuando se hace una preparación del extracto nuclear de SV 40. Lo que sí se observa es una variedad de formas de cromatina parcialmente encapsidadas. Resultados que concuerdan cuando se trabaja con glutaraldehído como fijador de las formas nucleoproteicas de SV 40. Se trata de un agente químico que evita cambios ulteriores en la morfología en condiciones como las que plantea el cloruro de cesio, con lo cual permite comprobar si tales cápsides vacías existen o no. Nuestro estudio de la cápside vacía, tras purificación con cloruro de cesio, nos manifiesta



ANALISIS de las proteínas histonas en condiciones ácidas, por comparación entre las histonas celulares y las asociadas al ADN del virus SV 40. El gráfico superior representa el perfil de absorción densitométrica obtenido en un análisis de histonas celulares. El gráfico central y el inferior dan los perfiles de radiactividad incorporada con el aminoácido lisina-H^3, en un experimento en el que se analizaron las histonas en el complejo nucleoproteínico NP I y en el virión, respectivamente. Puede apreciarse que no hay H1 en los viriones. La separación de histonas en geles de poliacrilamida que contienen ácido acético y urea ocurre de acuerdo con dos parámetros: contenido en cargas positivas y peso molecular. H3 y H4 son dos histonas que poseen subfracciones con distintos contenidos en grupos acetil a lo largo de sus cadenas polipeptídica; ello se refleja en la separación por electroforesis.



ESQUEMA DE ENSAMBLAJE del virus SV 40, a partir de los componentes fundamentales de la cromatina: histonas y ADN. Gradualmente se van sumando proteínas de la cápside a la cromatina vírica, con la organización subsiguiente de la nucleocápside en una estructura resistente a concentraciones altas de sales. El complejo nucleoproteico NP I se transforma en el NP II, que pasa a una forma intermedia de encapsidación para constituir el virión.

que el efecto disociador de C1Cs provoca esos tipos de estructuras, que no se advierten en preparaciones realizadas a partir de núcleos infectados, en fase tardía de infección. Sería, a nuestro parecer, un artefacto producido por la propia preparación experimental.

En presencia de C1Cs, las nucleoproteínas víricas NP I sufren disociación del ADN, las histonas y las proteínas de la cápside; en nucleoproteínas NP II, el C1Cs determina la disociación del ADN, las histonas y las proteínas de la cápside, más la producción de cápsides vacías. El virión maduro se muestra resistente a la acción atacante del cloruro de cesio.

El otro interrogante a resolver era el de la presencia de la histona H1 en las formas no encapsidadas de cromatina vírica. Nuestra investigación demuestra que, evidentemente, sólo se da esa histona en las formas antedichas, pero no en el virión. Cuando se fijan las formas de cromatina vírica con glutaraldehído y se sedimentan en gradiente de cloruro de cesio, el material que sedimenta, a una densidad de 1,35 gramos por mililitro, son viriones. Y, puestos a analizar sus componentes proteínicos en condiciones ácidas, hallamos todas las histonas, excepto la H1. Para nosotros lo que ocurre es que, durante el proceso de encapsidación de la proteína vírica, se sustituye la histona H1 por una proteína vírica, la VP 3, necesaria para la condensación del ADN del virus dentro de la cápside y estabilizar así el complejo ADN-histonas.

Del modelo de ensamblaje que postulamos se desprenden varias cuestiones de interés: saber si existe en el genoma de SV 40 alguna región específica a la que se asocie, en primer lugar, una proteína vírica que sirva de lugar de iniciación para la organización de la cápside, y, en segundo lugar, si está o no organizada la cápside del virus. Aunque las proteínas víricas están fosforiladas, resulta improbable que la propia fosforilación sea la causa de tal organización. Permanece como cuestión abierta confirmar la posibilidad de que sí haya enlaces disulfuro entre proteínas VP 1.

El modelo postulado sirve de base para nuevos estudios sobre mecanismos más específicos que acontecen a lo largo del proceso de ensamblaje de la cromatina SV 40. Una vía posible sería averiguar las relaciones de estructura y función de la cromatina y, dentro de ellas, los métodos bioquímicos de interconversión, in vitro, de las diferentes cromatinas de SV 40. Otra vía, descifrar el significado de polímeros de viriones, etcétera.

La breve vida de Évariste Galois

Según la leyenda, este joven matemático redactó la teoría de grupos en la noche anterior al duelo en que recibió un tiro fatal. Una investigación más cuidadosa hace ver que las originales ideas de Galois tardaron algo más en madurar

Tony Rothman

Evariste Galois, joven prodigio y matemático francés, contaba tan sólo 20 años de edad cuando en la madrugada del 30 de mayo de 1832 escribía a sus amigos Napoleon Lebon y V. Delauney:

"He sido provocado por dos patriotas... Me es imposible rehusar. Os ruego vuestro perdón por no habéroslo dicho. Pero mis adversarios me han exigido palabra de honor de no informar a ningún patriota. Vuestra tarea es sencilla: demostrad que he de combatir contra mi voluntad, tras haber agotado todos los medios de reconciliación posibles; decid si soy capaz de mentir ni siquiera en lo más baladí. Por favor, recordadme, ya que el destino no me ha dado vida bastante para ser recordado por mi patria.

Muero amigo vuestro,
É. Galois"

Esa misma noche, Galois escribía también a su amigo Auguste Chevalier:

"He hecho algunos descubrimientos nuevos en análisis. El primero concierne a la teoría de ecuaciones; los otros, a las funciones enteras.

"En teoría de ecuaciones he investigado las condiciones de solubilidad de ecuaciones por medio de radicales; con ello he tenido ocasión de profundizar en esta teoría y describir todas las transformaciones posibles en una ecuación, aun cuando no sea posible resolverla por radicales. Todo ello puede verse aquí, en tres memorias...

"Haz petición pública a [Carl Gustav Jacob] Jacobi o a [Carl Friedrich] Gauss para que den su opinión, no acerca de la veracidad, sino sobre la importancia de estos teoremas. Confío en que después algunos hombres encuentren de provecho organizar todo este embrollo."

El desesperado estado de ánimo en que se encontraba Galois al escribir estas cartas estaba plenamente justificado, como tristemente habrían de probar los acontecimientos inmediatos. Poco después del amanecer de esa misma noche, Galois abandonó su habitación de la pensión Sieur Faultrier, en París, y se enfrentó en duelo de honor a un activista político llamado Pescheux d'Herbinville, a las orillas de un estanque cercano. Allí Galois recibió un balazo en el abdomen, quedando abandonado. Más tarde un transeúnte lo encontró y llevó al Hôpital Cochin, donde murió al día siguiente. Catorce años después, los manuscritos que dejó para Chevalier fueron publicados por el matemático francés Joseph Liouville, naciendo de esta forma la rama, excepcionalmente fecunda, de la matemática conocida hoy por teoría de grupos.

En la historia de la ciencia pocos relatos pueden igualar en contenido novelesco y romántico los hechos conocidos sobre la vida y muerte de Galois. Empero, justamente por la fuerza coercitiva de estos hechos, es fácil excederse en la lectura de las cartas de Galois, y tentador ir espigando en los acontecimientos que tuvieron conclusión en el duelo, en búsqueda de una ilación capaz de encajar u explicar el melodrama evidente en sus escritos.

Se sabe, por ejemplo, que a la edad de 17 años Galois contribuyó a crear una rama de la matemática que hoy estructura y facilita la comprensión de campos tan diversos como la aritmética, la cristalografía, la física de partículas elementales y las posiciones accesibles del cubo de Rubik. Asimismo, existe prueba documental de que a igual edad Galois suspendió por segunda vez el examen de matemáticas para ingresar en la École Polytechnique. Tuvo que estudiar, en cambio, en la École Normale de París. Empero, a los 19 años ya había sido expulsado de esta escuela, y por dos veces detenido y encarcelado a causa de sus actividades políticas. Poco antes del duelo se enredó en un desdichado asunto amoroso, que en una de sus cartas últimas parecía relacionar con el duelo mismo. "Muero, escribió, víctima de una coqueta infame y de sus dos encandilados."

Desafortunadamente, algunos de los biógrafos que Galois ha tenido en nuestro siglo no han resistido la tentación de aderezar, interpretar y embellecer tales hechos. Lo que la mayoría de la gente conoce acerca de la vida de Galois se funda en relatos populares, como los del físico Leopold Infeld o el astrónomo Fred Hoyle. La versión que mayor influencia ha tenido en la creación del mito de Galois ha sido la de Eric Temple Bell, matemático cuya obra *Men of Mathematics* (versión española, "Los grandes matemáticos"), publicada en 1937, es seguramente la más famosa recopilación de vidas de grandes matemáticos.

En las repeticiones populares de esta historia, Galois es presentado como genio incomprendido, sojuzgado por la estupidez de sus maestros, olvidado por la organización matemática institucional y espoleado y arrastrado por los acontecimientos de la época a un activismo político que habría de mermar sus energías y, finalmente, costarle la vida. Lo más notable de todo es que, según estas versiones, durante todo el período de agitación política, e incluso durante su estancia en la cárcel, Galois continuase desarrollando sus ideas matemáticas "de cabeza", para acabar poniéndolas por escrito la noche anterior al duelo. Vale la pena reproducir aquí la descripción que da Bell de esta noche última, porque probablemente sea la que mayor impulso ha dado al mito de Galois:

"Durante toda la noche estuvo febrilmente luchando contra las fugaces horas, garrapateando su testamento científico y su última voluntad, espigando, con el tiempo en contra, algunas de las grandes cosas que había elaborado su mente fecunda, antes de que la muerte, que ya veía, le diese alcance. Una y otra vez se detuvo para anotar al mar-

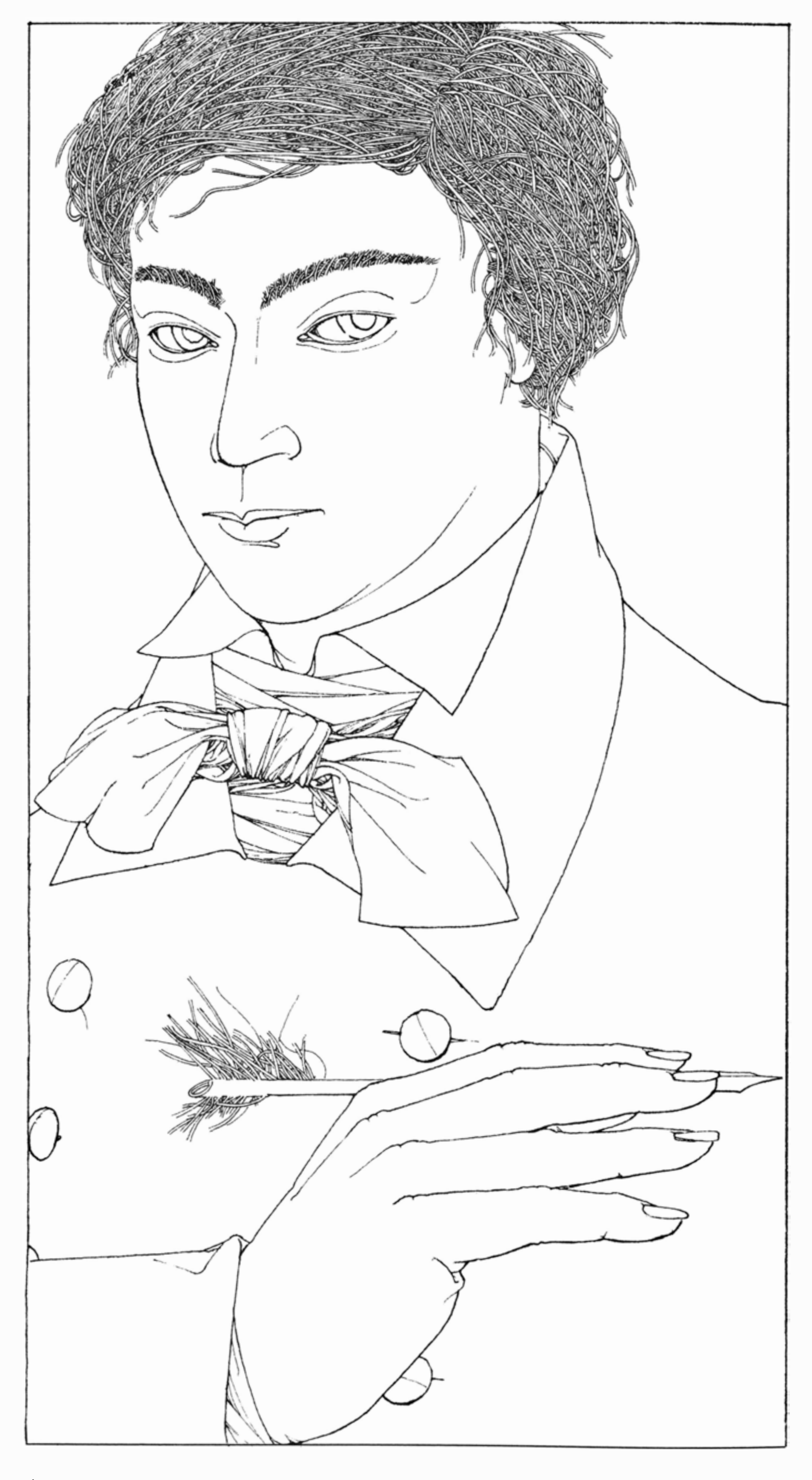
gen 'No tengo tiempo, no tengo tiempo', para continuar enseguida esbozando velozmente otro tema. Lo que Galois escribió antes del amanecer, en aquellas horas desesperadas, mantendrá ocupadas a generaciones de matemáticos, durante cientos de años."

Recientemente, con ayuda de Marc Henneaux y Cecile DeWitt-Morrette, de la Universidad de Texas en Austin, he leído algunos de los trabajos de Galois, así como los últimos trabajos doctos acerca de su vida. Aunque de la lectura de estos materiales resulta evidente que todos los acontecimientos relevantes de la vida de Galois se conocen desde hace tiempo, la reconstrucción de Bell (y las de otros) revelan más acerca de los estereotipos de genio científico que tanto atraen a la imaginación popular de lo que realmente revelan de Galois. La novela auténtica de Évariste Galois es fascinante por derecho propio, y merece ser recordada en el 150 aniversario de su muerte.

Aparte de cartas, registros oficiales y otros documentos de la época, la fuente principal sobre la vida de Galois es una biografía, fechada en 1896, escrita por Paul Dupuy, historiador y superintendente general de la École Normale, facultad a la que había asistido Galois 66 años antes. Según Dupuy, Galois nació el 25 de octubre de 1811, en Bourg-la-Reine, cerca de París. Su padre, Nicholas-Gabriel Galois, era partidario de Napoleón y cabeza del partido liberal en la localidad, llegando, durante los Cien Días, al retornar Napoleón de su exilio, a ser elegido alcalde de la villa.

Durante los primeros 12 años de su vida, Évariste fue educado por su madre, Adelaïde-Marie Demante Galois, quien proporcionó a su hijo una sólida formación básica en latín y griego, y al que traspasó su escepticimo por las formas institucionalizadas de religión. No obstante, es poco verosímil que el joven Galois se viera expuesto en matemáticas a mucho más de las habituales lecciones de aritmética; en aquel entonces no se consideraba importante la formación matemática. Tampoco se tiene noticia de que se hayan dado casos de talento matemático especial en las ramas paterna o materna de la familia.

La educación regular de Galois comenzó en 1823, cuando ingresó en el Collège Royal de Louis-le-Grand, de París, escuela preparatoria que fue *alma mater* de Robespierre y Victor Hugo (abierta todavía hoy). En el Louis-le-Grand, Galois comenzó inme-



ÉVARISTE GALOIS, por David A. Johnson. El matemático aparece ahí a los 17 años, cuando era alumno del Collège Royal de Louis-le-Grand. Aunque hasta esa fecha sólo había estudiado matemáticas durante dos años, ya había publicado un trabajo sobre fracciones continuas y emprendido los estudios de teoría de ecuaciones que habrían de llevarle a la teoría algebraica abstracta de sistemas de objetos, que él llamó grupos. Es preciso reconocer también a otros matemáticos de finales del siglo XVIII y comienzos del XIX el mérito de haber creado y desarrollado la teoría de grupos, particularmente, a Paulo Ruffini, Neils Henrik Abel y Joseph Louis Lagrange. Empero, suele otorgarse a Galois el título de fundador de la teoría de grupos. El dibujo de Johnson está basado en los dos retratos de Galois que se conocen. Uno, realizado cuando Galois contaba 15 años y, el otro, terminado en 1848, a los 16 años de la muerte de Évariste.

ainsi $F = \varphi V$, et l'on aura

$$\varphi V = \varphi V' = \varphi V'' = \ldots = \varphi V^{(n-1)}$$

La valeur de F pourra donc se déterminer rationnellement.

2°. Réciproquement. Si une fonction F est déterminable rationnellement, et que l'on pose $F = \varphi V$, on devra avoir

$$\varphi V = \varphi V' = \varphi V'' = \ldots = \varphi V^{(n-1)}$$

puisque l'équation en V n'a pas de diviseur commensurable et que V satisfait à l'équation rationnelle $F = \varphi V$, F étant une quantité rationnelle. Donc la fonction F sera nécessairement invariable par les substitutions du groupe écrit ci-dessus.

Ainsi ce groupe jouit de la double propriété dont il s'agit dans le théorème proposé. Le théorème est donc démontré.

Nous appellerons groupe de l'équation le groupe en question.

Scholie. Il est évident que dans le groupe de permutations dont il s'agit ici, la disposition des lettres n'est point à considérer, mais seulement les substitutions de lettres par lesquelles on passe d'une permutation à l'autre. Ainsi l'on peut se donner arbitrairement une première permutation, pourvu que les autres permutations s'en déduisent toujours par les mêmes substitutions de lettres. Le nouveau groupe ainsi formé jouira évidemment des mêmes propriétés que le premier, puisque dans le théorème précédent, il ne s'agit que des substitutions que l'on peut faire dans les fonctions.

Ce qui caractérise un groupe. On peut partir d'une des permutations quelconques du groupe.

Scholie. Les substitutions sont indépendantes même du nombre des racines.

$S + T = V$

$S + T + S + T + S + T$

S^{+}

$T \quad 2T$

PROPOSITION II.

Théorème. Si l'on adjoint à une équation donnée la racine r d'une équation auxiliaire irréductible, 1° il arrivera de deux choses l'une : ou bien le groupe de l'équation ne sera pas changé ; ou bien il se partagera en p groupes appartenant chacun à l'équation proposée respectivement quand on lui adjoint chacune des racines de l'équation auxiliaire. 2° ces groupes jouiront de la propriété remarquable, que l'on passera de l'un à l'autre en opérant dans toutes les permutations du premier une même substitution de lettres.

Il y a quelque chose à compléter dans cette démonstration. Je n'ai pas le temps. (Note de l'A.)

1°. Si, après l'adjonction de r, l'équation en V dont il est question plus haut reste irréductible, il est clair que le groupe de l'équation ne sera pas changé. Si au contraire elle se réduit, alors l'équation en V se décomposera en p facteurs tous de même degré et de la forme

$$f(V, r) \times f(V, r') \times f(V, r'') \times \ldots$$

r, r', r'' .... étant d'autres valeurs de r. Ainsi le groupe de l'équation proposée se décomposera aussi en groupes chacun d'un même nombre de permutations, puisqu'à chaque valeur de V correspond une permutation. Ces groupes seront respectivement ceux de l'équation proposée, quand on lui adjoindra successivement r, r', r'', ...

Car si l'on élimine r entre $f(V, r) = 0$ et $F r = 0$, $F r$ étant le polynôme dont r est racine, il ne peut arriver que de deux choses l'une : ou le résultat de l'élimination sera de même degré en V que $f(V, r)$, ou il sera d'un degré p fois plus grand.

diatamente a sensibilizarse políticamente; sus simpatías liberales y antimonárquicas, adquiridas de sus padres, estaban en consonancia con las simpatías políticas de la mayoría de los alumnos.

No obstante, durante el primer año de Galois en el Louis-le-Grand, las relaciones entre el alumnado y el provisor recién nombrado fueron ásperas y tirantes. Los alumnos sospechaban que el nuevo provisor se proponía devolver el colegio a los jesuitas, vanguardia de la reacción derechista que siguió a la era napoleónica. Los alumnos hicieron un plante sin excesiva trascendencia: se negaron a cantar en la capilla, a recitar en clase y a brindar por Luis XVIII en un banquete colegial. En represalia, el provisor expulsó sumariamente a 40 alumnos sospechosos de haber encabezado la rebelión. Aunque Galois no fue expulsado (y se ignora si participó o no en el plante), la arbitraria acción del provisor contribuyó sin duda a fomentar los recelos que Galois pudiera sentir hacia la autoridad.

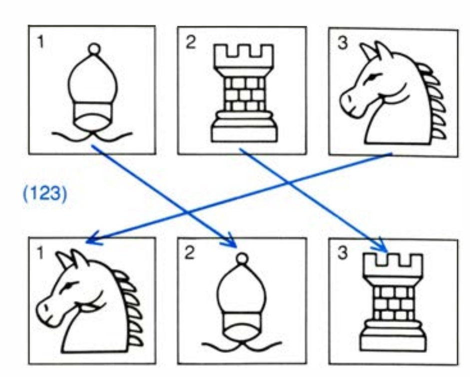
Pocas pruebas hay de que Galois fuese mal estudiante, o de que su desarrollo intelectual se resintiera a causa de un profesorado mediocre, como gustan referir las biografías más difundidas. En sus primeros años de liceo, Galois ganó varios premios de griego y latín, amén de media docena de menciones honoríficas. Un historiador de la ciencia, René Taton, califica sus progresos de brillantes. Empero, durante el tercer año, su trabajo en retórica fue considerado insuficiente, y Galois tuvo que repetir curso. Contrariamente a lo afirmado por Bell, los deficientes resultados en retórica no fueron consecuencia de su pasión por el álgebra, pues fue después de este tropezón cuando Galois recibió su primer curso de matemáticas. Tenía entonces 15 años.

El curso, impartido por Hippolyte Jean Vernier, despertó el genio matemático de Galois. Tras engullir a toda velocidad los manuales al uso, fue derecho hacia las obras maestras de la época, devorando los *Éléments de Géométrie* de Adrien Marie Legendre, emprendiéndola inmediatamente con las memorias originales de Joseph Louis Lagrange: *La resolución de ecuaciones algebraicas, La teoría de funciones analíticas* y las *Lecciones sobre el cálculo de funciones*. Fue sin duda de Lagrange de quien aprendió por vez primera la teoría de ecuaciones, teoría a la que él mismo habría de realizar contribuciones fundamentales a lo largo de los cuatro años siguientes. Según parece, Vernier sí supo apreciar el talento de su discípulo: en los informes trimestrales, al hablar de Galois, se leen elogios tales como "celo y éxito" y "celo con muy sobresalientes progresos".

El descubrimiento de las matemáticas provocó un sorprendente cambio en la personalidad de Galois. Empezó a descuidar las otras materias, atrayendo hacia sí la hostilidad de los profesores de humanidades. Sus profesores de retórica lo tildaron de "disoluto" en las calificaciones trimestrales; en sus evaluaciones se leen palabras "introvertido y reservado", "excéntrico" y "original". Incluso Vernier, aunque sin pretender enfriar la pasión matemática de Galois, le insistió en la necesidad de trabajar más sistemáticamente. Galois no siguió sus consejos; decidió en cambio presentarse al examen de ingreso en la École Polytechnique con un año de anticipación y sin el curso de preparación matemática habitual. Careciendo, como es obvio, de parte de la formación fundamental, fue rechazado.

Galois consideró su fracaso como una injusticia, y ello endureció su rechazo de la autoridad. No obstante continuó progresando rápidamente en matemáticas, matriculándose en el curso superior de esta ciencia en el Louis-le-Grand, impartido por un distinguido profesor, Louis-Paul-Émile Richard. Richard se percató inmediatamente de las dotes de Galois, solicitando que fuera admitido sin examen previo en la École Polytechnique. Aunque su recomendación no fue atendida, el estímulo de Richard produjo en Galois resultados espectaculares. En marzo de 1829, siendo todavía estudiante, Galois logró publicar su primer trabajo. Se titulaba "Demostración de un teorema sobre fracciones continuas periódicas", y apareció en *Annales de mathématiques pures et appliquées*, de Joseph Diaz Gergonne.

LA NOTA AL MARGEN de uno de los artículos que Galois dejó tras sí en la madrugada del duelo es el más famoso documento citado en respaldo de la leyenda de que Galois puso por escrito sus ideas sobre teoría de grupos en una sola noche. En la nota dice: "Hay cosas que terminar en esta demostración. No tengo tiempo. (Nota del autor.)" ("Il y a quelque chose à completer dans cette démostration. Je n'ai pas le temps. (Note de l'A.).") Según el conocido relato de la vida de Galois escrito por Eric Temple Bell, la frase "No tengo tiempo" aparece frecuentemente en los manuscritos. En realidad, tal frase se encuentra únicamente en la página reproducida aquí. La escritura rápida de la nota contrasta nítidamente con la cuidada caligrafía del cuerpo del texto, lo que hace pensar que Galois no redactó la monografía durante la noche anterior al duelo, sino que tan sólo hizo en ella correcciones. En realidad, el trabajo había sido presentado a la Academia de Ciencias y devuelto a Galois por Siméon Denis Poisson, para que lo reelaborara.



NOCION DE GRUPO, ilustrada por el grupo *S*(3), que es el grupo de permutaciones de tres objetos. Cada elemento de *S*(3) actúa sobre los objetos, reordenándolos. La permutación (123) traslada el objeto situado en el primer recuadro al segundo, el objeto del segundo cuadro al tercero, y el objeto colocado en el tercer cuadro, al primero. Dado que tres objetos pueden alinearse de seis formas distintas, el grupo *S*(3) contendrá pues seis elementos.

Este artículo, sin embargo, no fue sino un pequeño aparte. Galois había ya dirigido su atención hacia la teoría de ecuaciones, tema que había explorado por primera vez en las obras de Lagrange. A sus 17 años estaba atacando uno de los más difíciles problemas de las matemáticas; un problema que había tenido en jaque a los matemáticos durante más de un siglo.

En 1829 el problema central de la teoría de ecuaciones era: ¿bajo qué condiciones puede resolverse una ecuación? Con mayor precisión, lo que se buscaba era un método para resolver ecuaciones polinómicas con una sola incógnita x, cuyos coeficientes fuesen todos números racionales y cuyo término principal, el de grado máximo, fuese x^n. El método debía ser general, aplicable a todas las ecuaciones de este tipo, y debía apoyarse solamente en las cuatro operaciones elementales de la aritmética (adición, sustracción, multiplicación y división), así como en la extracción de raíces. Cuando las soluciones –también llamadas raíces– de la ecuación pueden deducirse de los coeficientes valiéndose únicamente de estas operaciones, se dice que la ecuación es resoluble por radicales.

En vista del desarrollo histórico del problema, era natural esperar que la resolución de las ecuaciones de grado n no exigiera operaciones que trascendieran de la extracción de raíces n-ésimas. La solución de la ecuación general de segundo grado, $ax^2 + bx + c = 0$, conocida ya por los babilonios, requiere extraer la raíz cuadrada de una función de los coeficientes, a saber, su discriminante, b^2-$4ac$. Por consiguiente, la ecuación general de segundo grado es resoluble por radicales. Análogamente, la solución general de la ecuación cúbi-

ca, conseguida por los matemáticos italianos Scipione dal Ferro y Niccolò Fontana (conocido por Tartaglia), a principios del siglo XVI, requiere calcular raíces cúbicas de ciertas funciones de los coeficientes. La resolución de la ecuación general de cuarto grado, conseguida aproximadamente en esa misma época por el matemático italiano Lodovico Ferrari, exige a su vez la extracción de raíces cuartas.

Tal era la situación en los tiempos de Galois. Tras casi trescientos años de esfuerzos no se había alcanzado la resolución general de la ecuación de quinto grado –o superior– por medio de radicales, y cierto número de matemáticos habían llegado a sospechar que sería imposible alcanzar semejante objetivo, a pesar de que en ciertos casos particulares, como la ecuación $x^7 - 2 = 0$, las soluciones sí pueden calcularse por radicales. (En este ejemplo, una de las soluciones es $\sqrt[7]{2}$.) Lo que Galois consiguió fue dar criterios definitivos para determinar si las soluciones de una ecuación polinómica podrán o no calcularse por radicales. Sin embargo, más notables quizá que los descubrimientos de Galois en teoría de ecuaciones fuesen los métodos que ideó para estudiar el problema. Sus investigaciones abrieron las puertas de una teoría cuyas aplicaciones desbordan con mucho los límites de la teoría de ecuaciones, teoría hoy conocida con el nombre de teoría de grupos.

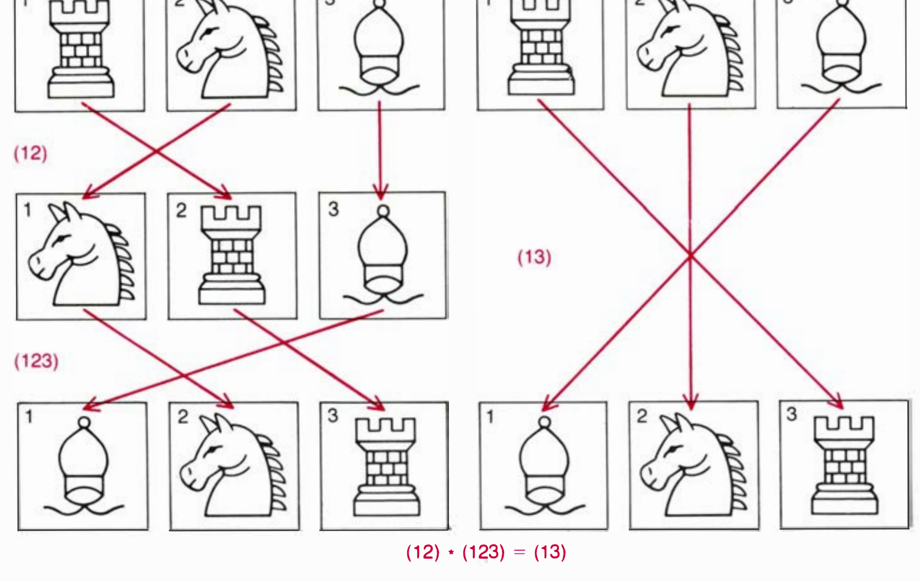
Galois presentó a la Academia de Ciencias Francesa sus primeros artículos sobre la que llegaría a ser teoría de grupos el 25 de mayo y el 1 de junio de 1829, casi al final de su último año en el Louis-le-Grand. Le faltaban menos de dos meses para examinarse por segunda vez de las pruebas de acceso a la École Polytechnique, pero en el ínterin los acontecimientos de su vida habrían de tomar un desdichado giro. El 2 de julio, apenas unas semanas antes del examen, el padre de Évariste puso fin a su vida, asfixiándose, en su apartamento de París. El párroco de Bourg-la-Reine, jesuita, había imitado el nombre de Galois padre en cierto número de maliciosos epigramas dirigidos contra los propios parientes de Galois; no tuvo fuerzas para arrostrar el escándalo. Las circunstancias en que se planteaba el examen de ingreso eran las peores posibles. Además, al parecer, Évariste declinó seguir en su exposición las indicaciones del examinador y fue suspendido por segunda y definitiva vez. Estos dos desastres hicieron cristalizar su odio por la jerarquía conservadora, entonces gobernante en Francia.

Viéndose obligado a tomar en consideración la menos prestigiosa École Normale (a la sazón llamada École Préparatoire), Galois se presentó a los exámenes de bachillerato, necesario para ser admitido, en noviembre de 1829. Esta vez fue aprobado en razón de una excepcional calificación en matemáticas, recibiendo la categoría de universitario aproximadamente al mismo tiempo que sus trabajos sobre teoría de grupos iban a ser presentados a la Academia de Ciencias. Sus artículos, sin embargo, nunca llegarían a ver la luz del día.

Cuando sus trabajos fueron recibidos por la Academia, fue designado para informarlos Augustin Louis Cauchy, a la sazón el más eminente de los matemáticos franceses y decidido partidario de la restauración conservadora. Aunque según la leyenda Cauchy perdió, olvidó o desechó los manuscritos de Galois, es mucho más verosímil que Cauchy se percatase de su importancia y que les prestase atención. En efecto, una carta descubierta por Taton en los archivos de la Academia, en 1971, prueba que Cauchy proyectaba someter al juicio de la Academia los resultados de Galois el 18 de enero de 1830. Cauchy escribía: "Estaba previsto que yo presentase hoy a la Academia... un informe sobre el trabajo del joven Galois. ... me encuentro indispuesto, en casa. Lamentando no poder asistir a la sesión de hoy, me gustaría figurar en el orden del día de la próxima reunión... para (tratar) los temas indicados."

Empero, la siguiente semana, ocasión en que Cauchy leyó un trabajo propio ante la Academia, no hizo mención del trabajo de Galois. Por qué ocurrió así es materia de especulación. Taton conjetura que Cauchy debió insistirle a Galois para que desarrollase más su trabajo y lo presentara al concurso del Gran Premio de Matemáticas de la Academia. Aunque la conjetura de Taton todavía no ha podido tener confirmación documental, la verdad es que Galois sí presentó en febrero –un mes antes del límite del plazo– una monografía, aspirando al premio. El trabajo fue enviado a Jean Baptiste Joseph Fourier, matemático inventor del hoy llamado análisis armónico o análisis de Fourier, en su calidad de secretario perpetuo de la Academia. Desgraciadamente, Fourier murió en mayo, y el manuscrito de Galois no pudo hallarse entre los efectos de Fourier. Más tarde, Galois atribuiría su mala suerte a un intento malicioso de la Academia, acusando al jurado del premio de rechazar su trabajo de antemano, por ser su autor de nombre Galois y, además, tan sólo un estudiante. La leyenda construida en torno a Galois ha dado pábulo a estas acusaciones, aceptándolas *prima facie*; pero pocas dudas caben hoy de que la actitud de Galois hacia las autoridades empezaba a mostrar rasgos paranoides.

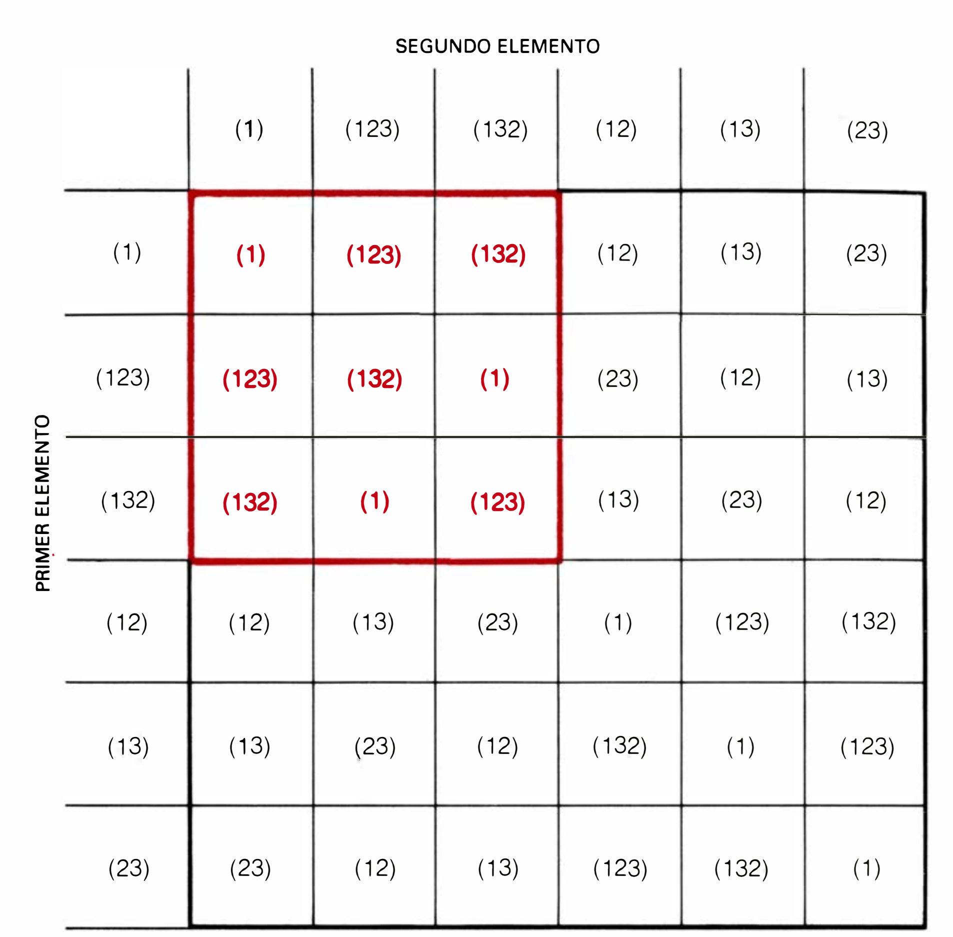
A pesar de esos retrasos y desengaños, Galois continuó siendo matemático productivo y empezó a publicar en el *Bulletin des sciences mathémati-*



"MULTIPLICAR" un elemento de $S(3)$ por otro consiste en determinar la colocación de los objetos resultantes de ejecutar la primera permutación y aplicar a la disposición resultante la segunda permutación. La permutación que por sí sola produciría la reordenación final es el producto de las dos permutaciones. En general, en los grupos la multiplicación no es conmutativa: el producto de dos elementos depende del orden en que se apliquen. Así, (12)*(123) es igual a (13), mientras que (123)*(12) es (23).

ques, astronomiques, physiques et chimiques del Barón de Férussac, foro mucho menos llamativo, sin embargo, que las sesiones de la Academia. Sus artículos prueban claramente que en 1830 había ido más allá que ningún otro matemático en la búsqueda de las condiciones que determinan la solubilidad de las ecuaciones, si bien no disponía todavía de un análisis completo. No obstante, en enero de 1831 sí había llegado a una conclusión, que sometió a la Academia en una nueva memoria, escrita a petición del matemático Siméon Denis Poisson. Esta memoria es la más importante de las obras de Galois, y su existencia, más de un año antes del duelo, muestra cuán absurda es la pretensión de que todo el trabajo de Galois sobre teoría de grupos fuese redactado en una sola noche.

Para comprender el trabajo de Galois no resulta ventajoso el estudio de sus trabajos originales. Poisson hizo cuanto pudo para comprender el manuscrito en 1831, pero acabó recomendando a la Academia que lo rechazase, y animando a Galois a desarrollar y explicitar su exposición. Poisson criticó también una de las demostraciones de Galois, considerándola inadecuada, si bien la validez del enunciado en cuestión podía probarse gracias a un resultado de Lagrange. Según Peter Neumann, de la Universidad de Oxford, la crítica de Poisson es completamente atinada. Galois presentaba sus razonamientos en forma sumamente concisa, lo que hace muy difícil recomponerlos y, además, no carecían de errores. Con la ventaja que nos proporciona siglo y medio de clarificación, ya puede presentarse lo esencial de la teoría de Galois en forma accesible. A este fin he contado con la ayuda del astrónomo y físico Adrian C. Ottewill, de Oxford.



SEGUNDO ELEMENTO (columnas) / PRIMER ELEMENTO (filas)

	(1)	(123)	(132)	(12)	(13)	(23)
(1)	**(1)**	**(123)**	**(132)**	(12)	(13)	(23)
(123)	**(123)**	**(132)**	**(1)**	(23)	(12)	(13)
(132)	**(132)**	**(1)**	**(123)**	(13)	(23)	(12)
(12)	(12)	(13)	(23)	(1)	(123)	(132)
(13)	(13)	(23)	(12)	(132)	(1)	(123)
(23)	(23)	(12)	(13)	(123)	(132)	(1)

TABLA DE MULTIPLICAR de las seis permutaciones de tres objetos, que permite verificar que éstas satisfacen las condiciones de grupo. La tabla muestra que para cualesquiera dos permutaciones a y b, su producto $a*b$ es también una permutación. Existe un elemento neutro, la permutación identidad (1), tal que $a*(1)$ es siempre igual a a. Para cada elemento a existe un elemento llamado inverso de a y denotado a^{-1} tal que $a*a^{-1}$ es igual a (1). El inverso de (123), por ejemplo, es (132). Finalmente, la ley asociativa, que establece que para cualesquiera permutaciones a, b y c los productos $(a*b)*c$ y $a*(b*c)$ son iguales, puede comprobarse con auxilio de la tabla. Las permutaciones en color forman un subconjunto de las seis permutaciones. Su tabla de multiplicar, enmarcada asimismo en color, muestra que también ellas forman grupo. Un grupo de este tipo, que forma parte de otro, se conoce como subgrupo propio del primero.

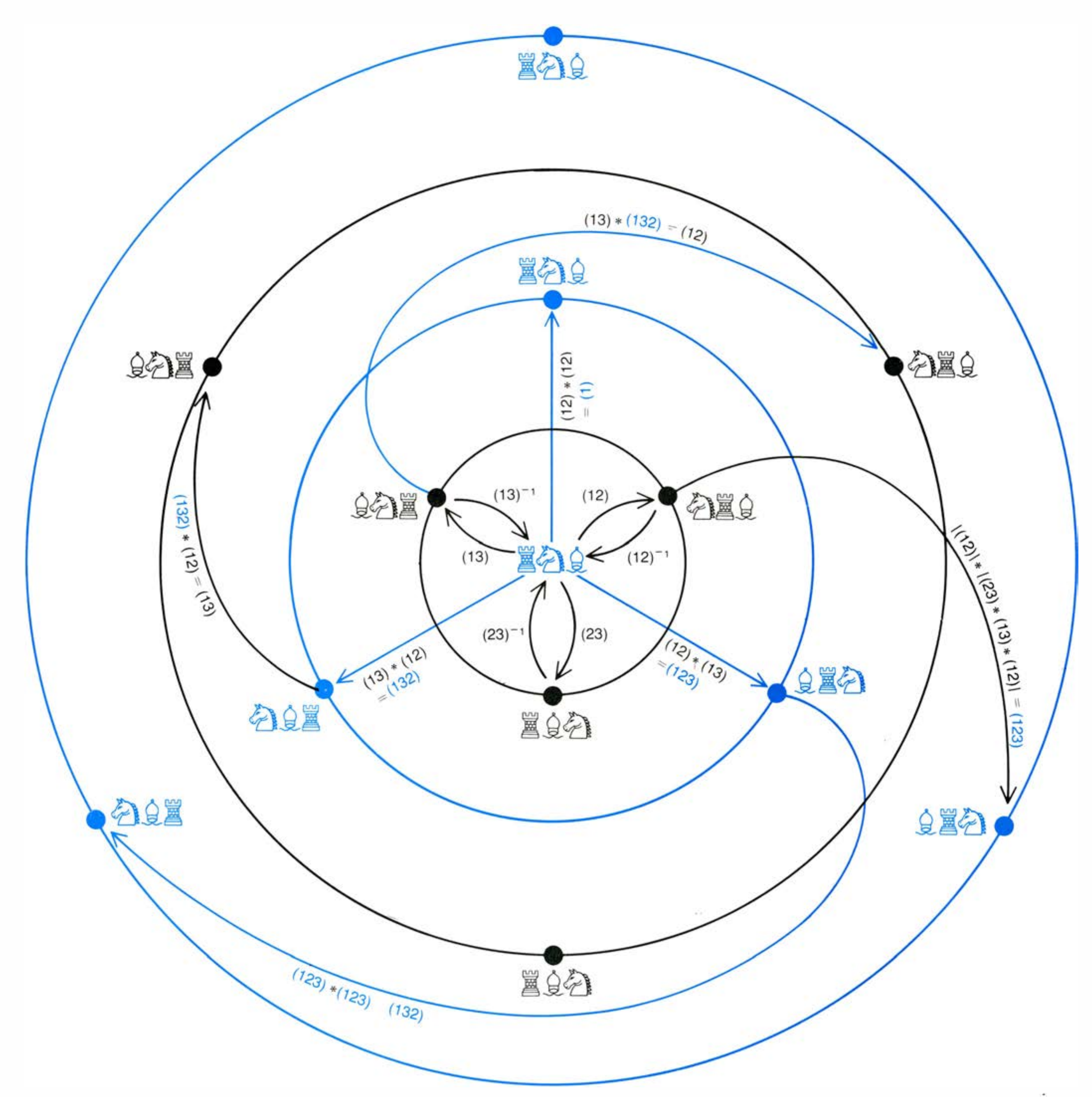
¿Qué es un grupo? En su nivel más profundo, la teoría de grupos se ocupa de las simetrías intrínsecas de un sistema cualquiera. Imaginemos un copo de nieve, cuyas puntas o vértices se encuentran uniformemente espaciadas según ángulos de 60 grados. Al girar el copo de nieve 60 grados, o múltiplos enteros de esta magnitud, en torno a un eje que lo atraviese perpendicularmente por su centro, el aspecto de la configuración permanece invariable, si bien cada uno de sus vértices ha cambiado de posición. Las operaciones que dejan "invariante", en el sentido anterior, a una configuración dada, se llaman operaciones de simetría de la configuración.

Al efectuar en sucesión dos rotaciones de amplitud múltiplo de 60 grados, el copo de nieve permanece invariante, pudiendo haberse alcanzado la posición final de los vértices con una sola operación. Por ejemplo, un giro de 60 grados en sentido antihorario, seguido de otro giro de 240 grados en sentido horario equivale a un giro de 180 grados en sentido horario. En general, si denotamos $R(n)$ al giro de amplitud $60n$ grados, y si el resultado de efectuar primero una de estas operaciones y enseguida la otra se denota $R(n)*R(m)$, resulta que $R(n)*R(m)$ es igual a $R(n+m)$. Desde el punto de vista matemático, esta equivalencia enuncia que el "producto" de dos operaciones de simetría es también una operación de simetría.

Los giros del copo de nieve gozan también de otras tres importantes propiedades. Ante todo, un giro de 0 grados, denotado $R(0)$, deja la configuración invariante, pues nada le hace. El producto de una rotación cualquiera $R(n)$ y de $R(0)$ es $R(n)$, con lo que $R(0)$ tiene respecto de las rotaciones un papel muy semejante al del número 1 en la multiplicación ordinaria. Por este motivo, $R(0)$ se denomina giro o rotación identidad. En segundo lugar, un giro $R(n)$ seguido de otro giro de igual amplitud y sentido contrario, que podemos denotar $R(-n)$, devuelve la figura a su posición inicial. Por consiguiente, el producto $R(n)*R(-n)$ es equivalente a $R(0)$. Al giro $R(-n)$ se le llama giro inverso del $R(n)$. Tercero, la expresión $R(m)*R(n)*R(p)$ no es ambigua, porque $[R(m)*R(n)]*R(p)$ equivale a $R(m)*[R(n)*R(p)]$. Tenemos aquí una propiedad formal de la operación * de composición de giros, llamada propiedad asociativa.

Las cuatro propiedades mencionadas de la composición de giros que dejan invariante al copo de nieve son características del conjunto de todas las operaciones de simetría de un sistema cualquiera: son las llamadas propiedades de grupo. No es preciso que el siste-

ma sea una figura geométrica, como el cristal de nieve. También una ecuación es un sistema cuyas "simetrías algebraicas" pueden describirse por las propiedades de grupo. En general, y de forma abstracta, un grupo está formado por una colección de elementos (operaciones de simetría) *a, b, c,...* etcétera, juntamente con una regla, que denotaremos por *, para combinar o componer ordenadamente dos cualesquiera elementos a y b del grupo. Se supone que los elementos del grupo y la regla * satisfacen el criterio de grupo cerrado, según el cual, tomados dos elementos cualesquiera a y b del grupo, $a*b$ es también elemento del grupo. El grupo ha de contener también un elemento identidad, denotado 1, tal que cualquiera que sea el elemento a que se tome en el grupo, el producto $a*1$ es igual a a. Además, para todo elemento a tiene que existir un elemento inverso a^{-1} que verifique que $a*a^{-1} = 1$. Final-



PERMUTACIONES DE $S(3)$. Pueden sin excepción expresarse como producto de permutaciones particulares que sólo intercambian dos objetos. Cuando la permutación es descomponible en número par de tales trasposiciones, la permutación se llama par; en otro caso la permutación es impar. Cuando las permutaciones pares (*círculos de color*) se multiplican por permutaciones pares (*flechas de color*) los productos son permutaciones pares; si las permutaciones pares se multiplican por permutaciones impares (*flechas negras*) los productos son impares. Análogamente, cuando las permutaciones impares (*círculos negros*) se multiplican por permutaciones pares, los productos son impares, mientras que al multiplicarlas por permutaciones impares, los productos son pares. Las permutaciones pares forman un subgrupo, a saber, el recuadro en color de la ilustración de la página anterior. Este subgrupo se llama grupo alternado, denotado $A(3)$. Un subgrupo, como el $A(3)$, se denomina subgrupo normal de $S(3)$ si para todo elemento h de $A(3)$ y todo elemento g de $S(3)$ el elemento $g*h*g^{-1}$ partenece también a $A(3)$. Para demostrar que $A(3)$ es un subgrupo normal de $S(3)$, supongamos que g sea permutación par. Entonces $g*h*g^{-1}$ es producto de tres permutaciones pares, y por tanto, también permutación par, es decir, elemento de $A(3)$. Si g es una permutación impar, $g*h*g^{-1}$ es producto de una permutación impar, por otra par, por otra impar, y resulta nuevamente permutación par. Un razonamiento parecido permite demostrar que para todo entero n, el subgrupo $A(n)$ es normal en $S(n)$. El número de elementos de un subgrupo ha de dividir exactamente, sin resto, al número de elementos del grupo paterno. Como $A(n)$ tiene la mitad de elementos de $S(n)$, ningún subgrupo propio de $S(n)$ puede contener más elementos que $A(n)$; por ello, $A(n)$ es el subgrupo normal maximal de $S(n)$. Recordemos que los elementos del grupo son las funciones, no las piezas.

mente, los elementos del grupo y la operación han de verificar la propiedad asociativa, que exige que $(a*b)*c$ sea igual que $a*(b*c)$.

La teoría de grupos es uno de los más fructíferos campos de investigación matemática; Bell tiene razón cuando escribe que mantendrá ocupados a los matemáticos durante cientos de años. Uno de los logros recientes de más importancia en teoría de grupos ha sido una demostración, anunciada en una reunión de la American Mathematical Society en enero de 1981, debida a Daniel Gorenstein, de la Universidad Rutgers. Demostró Gorenstein que una lista de 26 grupos, los llamados grupos finitos esporádicos, es una lista exhaustiva. En cierto sentido este descubrimiento conlleva que los componentes, los bloques constructivos, de cualquier grupo con un número finito de elementos han quedado definitivamente clasificados.

Otro sistema de elementos no numéricos que satisface las condiciones de grupo es el grupo de permutaciones de una colección dada de objetos. Los objetos a permutar pueden ser piezas de ajedrez, o letras del alfabeto, por ejemplo. Es indispensable darse cuenta, sin embargo, de que los elementos del grupo no son ni las piezas de ajedrez ni las letras, sino las funciones que generan las diversas reordenaciones. Para hallar el "producto" de dos elementos a y b de este grupo (es decir, para hallar $a*b$) se determina primero el resultado de la primera permutación sobre el conjunto de objetos y después se aplica la segunda permutación al resultado de la primera.

Supongamos tres piezas de ajedrez dispuestas así: una torre en la casilla número 1, un caballo en la número 2 y un álfil en el escaque número 3. Entre los elementos del grupo de permutaciones de estos objetos tenemos el denotado (12), que toma el objeto situado en la casilla 1 y lo lleva a la número 2, y recíprocamente, el objeto de la casilla 2 es llevado a la 1. El efecto de la permutación (12) sobre la disposición torre-caballo-álfil es intercambiar (trasponer) torre y caballo, generando la disposición caballo-torre-álfil. Al ejecutar por segunda vez la permutación (12) vuelven a trasponerse las piezas de los cuadros primero y segundo, recreando la colocación torre-caballo-álfil. Por tanto, el elemento (12) del grupo de permutaciones es inverso de sí mismo.

Otro de los elementos del grupo, designado (123), traslada el objeto del cuadro 1 al cuadro 2, el objeto del cuadro 2 al cuadro 3 y el emplazado en el 3 al cuadro número 1. Supongamos que la disposición inicial torre-caballo-álfil vuelva nuevamente a ser sometida a la acción de (12), dando la colocación caballo-torre-álfil. Ahora aplicamos el elemento (123), generándose la disposición álfil-caballo-torre. Esta colocación final podría haberse alcanzado en un solo paso a partir de la inicial, sin más que aplicar la permutación (13), que intercambia el objeto del cuadro 1 con el objeto del cuadro 3. Por tanto, el resultado de la permutación (12) seguida de la (123) genera la misma ordenación que (13). Simbólicamente, $(12)*(123) = (13)$.

El número de permutaciones o reordenaciones de n objetos es "factorial de n", denotado $n!$ El factorial de un número n es el producto de todos los números enteros desde 1 hasta n inclusive. Así, 5! es igual a $1\times2\times3\times4\times5 = 120$. Por tanto, el número de elementos de $S(n)$, grupo de permutaciones de n objetos, es $n!$ El número de elementos de un grupo se llama "orden" del grupo. El grupo $S(3)$ de permutaciones de 3 elementos contiene las seis permutaciones siguientes: (1), (12), (13), (23), (123), (132). Aquí (1) denota la permutación identidad, que no efectúa modificación alguna en la colocación de los objetos.

Resulta que ciertos subconjuntos del conjunto de elementos de un grupo pueden en ciertos casos satisfacer por sí solos todas las condiciones exigidas al grupo; en tal caso se dice que dichos subconjuntos son subgrupos del grupo. Cuando el subgrupo no contiene todos los elementos del grupo "paterno", se dice que el subgrupo es "propio". Por ejemplo, es fácil comprobar que [(1), (12)] es un grupo y, por tanto, subgrupo propio de $S(3)$.

A cada subgrupo propio H de un grupo dado G se le puede asociar un número, llamado índice o factor de composición de H respecto de G, igual al orden del grupo paterno dividido por el orden del subgrupo, y comúnmente denotado $[G/H]$. Así, el factor de composición del subgrupo [(1), (12)] con respecto al grupo $S(3)$ es 6/2, o sea, 3. De acuerdo con un teorema elemental que no se demostrará aquí, el orden de cualquier subgrupo divide exactamente al orden del grupo paterno, por lo que el factor de composición es invariablemente un número entero.

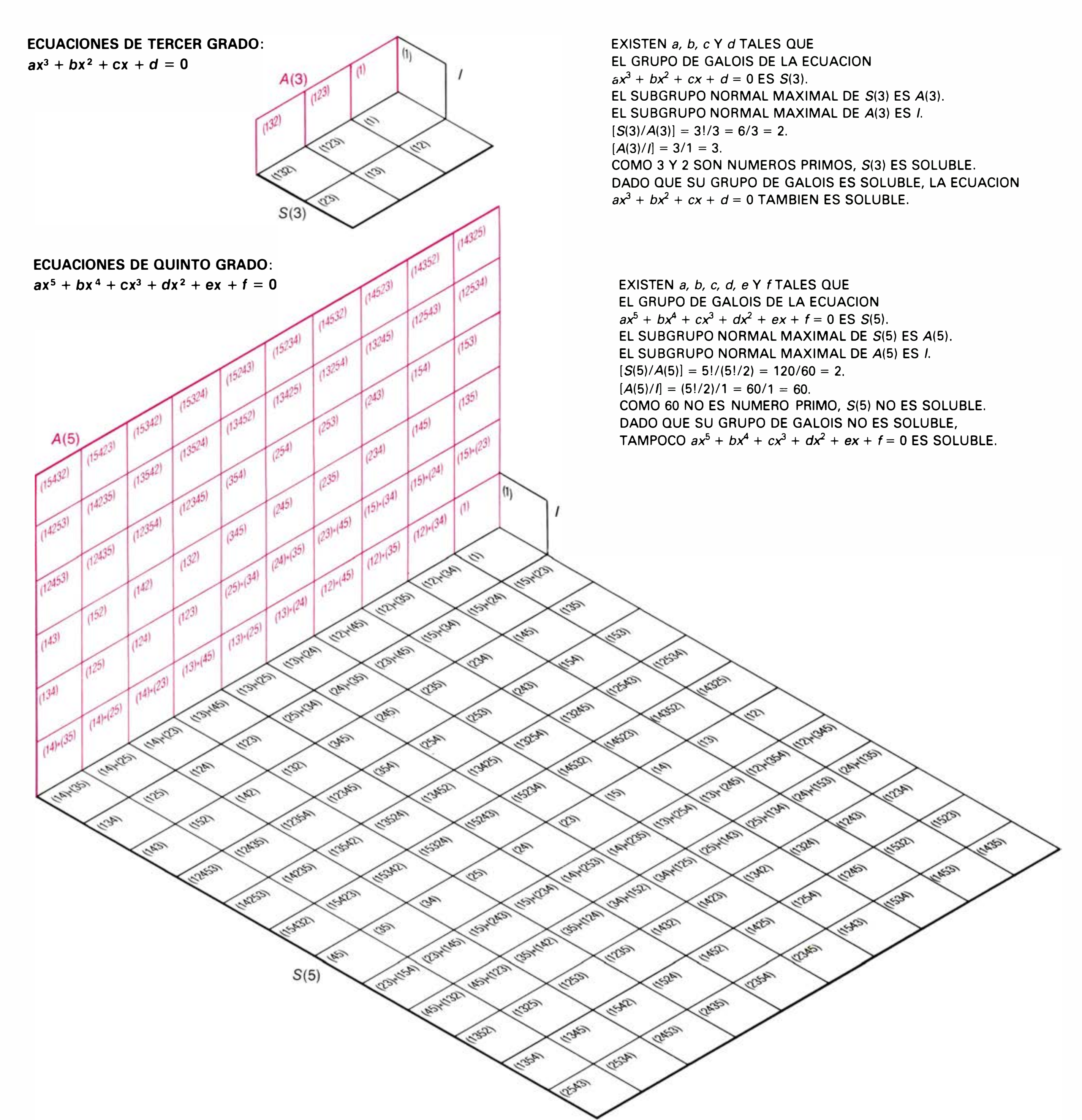
Galois introdujo tres nociones cruciales, cuyas relaciones mutuas le permitieron demostrar que no existe un método general para resolver ecuaciones de grado quinto o superior si se exige que todas las soluciones sean calculables por radicales. En primer lugar, Galois observó que a cada ecuación puede asociársele un grupo de permutaciones. Tal grupo es una representación de las propiedades "de simetría" de la ecuación, que hoy se denomina grupo de Galois de la ecuación.

Para hacernos una idea de las propiedades del grupo de Galois, fijémonos en cualquier ecuación de tercer grado cuyos coeficientes sean números racionales. Es posible demostrar que tal ecuación tendrá tres raíces, pero esta demostración no revela si las raíces serán calculables mediante radicales. Designando a estas raíces por u, v y w, podemos formar funciones polinómicas de ellas; por ejemplo: $u-v$, o $uv + w - 1$. Cualquiera de estas funciones puede transformarse en otra semejante, sin más que permutar las raíces u, v y w. Así, la permutación (12) intercambia u y v, convirtiendo la función $u - v$ en la $v - u$. Semejantes permutaciones cambian el valor de muchas de las funciones de las raíces, pero no el de todas ellas. Por ejemplo, la función $u+v+w$ no cambia de valor sea cual fuere la permutación de u, v y w que se efectúe. Como el grupo $S(3)$ contiene todas las posibles permutaciones de u, v y w, se dice que $u+v+w$ es invariante frente a $S(3)$.

Puede demostrarse que el valor de $u+v+w$ es un número racional en toda ecuación de tercer grado de coeficientes racionales. Otras funciones polinómicas de las raíces pueden tomar valores racionales en ciertas ecuaciones y valores irracionales en otras, según los coeficientes de la ecuación. Cuando el valor de tal función es racional, existe un grupo de permutaciones de u, v y w que dejan invariable el valor de la función. El grupo de Galois de una ecuación es el máximo grupo de permutaciones que verifican el requisito anterior para toda función polinómica de las raíces cuyo valor sea racional. Dicho de otra forma, cada una de las permutaciones del grupo de Galois de una ecuación deja invariable el valor de toda función polinómica de las raíces que tome valor racional. Cuando una permutación de las raíces deja inalterable el valor de todas las funciones polinómicas de valor racional construidas a partir de las raíces, la permutación es incapaz de "distinguir" las raíces. Por consiguiente, cuanto mayor sea el número de elementos del grupo de Galois, tantas más permutaciones habrá incapaces de distinguir unas raíces de otras. Por este motivo, el grupo de Galois es un poderoso instrumento de representación de las propiedades de simetría de las ecuaciones.

Por lo general el cálculo del grupo de Galois de una ecuación dada es difícil, aunque en principio siempre cabe hacerlo sin conocer siquiera los valores de las raíces. Empero, para los propósitos de Galois, tal cálculo no era necesario. Todo cuanto precisaba demostrar era que invariablemente existen ecuaciones de grado n cuyo grupo de Galois es el máximo grupo posible de permutaciones de las raíces, a saber, $S(n)$.

La segunda de las nociones introducidas por Galois es la de subgrupo normal. Se dice que un subgrupo H de un grupo G es normal en G cuando y solamente cuando se verifica la siguiente condición: al "multiplicar" por la izquierda cualquier elemento h del subgrupo H por un elemento cualquiera g del grupo paterno G y "multiplicar" después por la derecha el producto an-



LA RESOLUCION DE ECUACIONES fue el problema para el que Galois desarrolló la teoría de grupos. Los métodos generales de resolución de ecuaciones considerados aceptables deberían basarse únicamente en las operaciones de adición, sustracción, multiplicación, división y extracción de raíces, y tendrían que ser aplicables a cualquier ecuación de grado n, siendo n la máxima potencia a que viene elevada la incógnita. Galois demostró que no existe ningún método así a partir del caso $n = 5$. Cada ecuación de grado n tiene asociado el grupo $S(n)$ o algún subgrupo de $S(n)$; hoy, al grupo asociado a una ecuación se le llama grupo de Galois de la ecuación. Galois demostró que solamente serán resolubles por medios aritméticos y extracción de raíces aquellas ecuaciones cuyo grupo de Galois sea soluble, noción definida por él. Un grupo se llama soluble cuando genera una serie de subgrupos normales maximales cuyos factores de composición (que se determinan a partir de los números de elementos del grupo paterno y de los subgrupos) sean todos ellos primos. Los factores de composición generados por $S(3)$ y su serie de subgrupos normales son todos números primos; por ello todas las ecuaciones de tercer grado son resolubles. Sin embargo, cuando n es mayor o igual que 5, puede demostrarse que el subgrupo normal maximal de $A(n)$ es el grupo identidad, que contiene únicamente la permutación identidad. Como $A(n)$ es el subgrupo normal maximal de $S(n)$ los factores de composición de $S(n)$ no son todos primos cuando n es mayor o igual que 5. Hay pues ecuaciones de grado 5 o superior no resolubles por los métodos permisibles. Dibujo de Ilil Arbel.

terior por g^{-1} (elemento inverso de g), el resultado es todavía elemento del subgrupo H. Simbólicamente, si H es normal en G, cualesquiera que sean h perteneciente a H y g perteneciente a G existe un elemento h' de H tal que $h'=g^* h^*g^{-1}$. Por ejemplo, puede comprobarse que [(1), (123), (132)] es subgrupo normal de $S(3)$.

Cuando un grupo finito G tiene algún subgrupo normal propio, tiene también alguno cuyo orden sea máximo entre los subgrupos normales que contiene; son los llamados subgrupos normales maximales de G. Análogamente, un subgrupo normal maximal H puede a su vez contener un subgrupo normal maximal I (que quizá sea sólo normal con respecto a H); la sucesión de subgrupos normales maximales continuará de esta forma hasta llegar al mínimo subgrupo normal posible. Todo grupo genera así una sucesión de subgrupos, cada uno normal y maximal en el precedente. Denotando esta sucesión G, H, I, J,... podemos definir una sucesión de factores de composición normales maximales: [G/H], [H/I], [I/J], etcétera.

La tercera noción fundamental ideada por Galois fue la noción de grupo soluble. Galois llama soluble a un grupo cuando cada factor de composición normal maximal generado por el grupo es número primo. El subgrupo normal maximal de $S(3)$, por ejemplo, es [(1), (123), (132)]. A su vez, el subgrupo normal maximal de [(1), (123), (132)] es [(1)]. El factor de composición definido por $S(3)$ y el subgrupo [(1), (123), (132)] es 6/3, es decir, 2, y el factor de composición correspondiente al grupo [(1), (123), (132)] y su subgrupo [(1)] es 3/1, o sea, 3. Como 2 y 3 son ambos números primos, el grupo $S(3)$ es soluble.

El término "grupo soluble" queda bien justificado por la teoría de Galois, quien pudo demostrar que una ecuación es soluble por radicales si y solamente si el grupo de Galois de la ecuación es grupo soluble. Para demostrar que las ecuaciones de grados quinto o superior no pueden resolverse por radicales en el caso general, Galois tuvo que demostrar que hay ecuaciones de estos grados para los cuales el grupo correspondiente no es soluble. Resulta que el grupo $S(n)$ no es soluble cuando n es igual o mayor que 5 [*véanse las ilustraciones de las páginas 96 y 98*]. Puesto que para todos estos valores de n existen ecuaciones cuyo grupo de Galois es $S(n)$, la ecuación general de grado quinto o superior no podrá resolverse por radicales.

Por la época en que Galois había terminado casi su trabajo en teoría de grupos, los acontecimientos de su vida habían cobrado fuerte tinte político. En julio de 1830 la oposición republicana a la restaurada monarquía borbónica tomó las calles y obligó a exiliarse al rey Carlos X. Mientras los estudiantes izquierdistas de la École Polytechnique tuvieron en la lucha un papel activo, Galois y sus compañeros de la École Préparatoire fueron encerrados en la escuela por su director. Indignado, Galois intentó sin éxito escalar los muros; al no conseguirlo, no tomó parte en la breve revolución.

Aunque los republicanos consideraron una gran victoria la abdicación del Borbón, su triunfo fue efímero. Para frustración de Galois y de otros liberales de ideología afín, el trono fue nuevamente ocupado, esta vez por Luis Felipe de Orléans. En los meses inmediatos a la revolución, Galois entró en contacto con líderes republicanos (particularmente con François Vincent Raspail), ingresó en sociedades republicanas y, verosímilmente, intervino en las algaradas y manifestaciones que por entonces atormentaban París. En diciembre, la ruptura con la École Préparatoire era ya oficial. Galois había escrito una carta a su director, donde le llamaba traidor por su actitud durante la revolución de julio. No sorprende, pues, que le expulsaran.

La impresión que Galois nos produce en los sucesos de este período no es la de una víctima de las circunstancias, como gustan perfilarlo las leyendas. Más bien nos parece un exaltado cuya fogosidad y extremismo le creaban continuos problemas. Una carta de la matemática Sophie Germain deja entender que Galois asistía regularmente a las sesiones de la Academia de Ciencias, insultando habitualmente a los oradores. Tras su expulsión de la École Préparatoire se mudó al piso de su madre, en París; tan difícil resultaba convivir con él, que su propia madre le abandonó.

El suceso culminante de la turbulenta primavera de 1831 ocurrió el 9 de mayo, durante un banquete republicano donde se celebraba la absolución de 19 oficiales de artillería que habían sido acusados de conspirar contra el gobierno. Según las memorias de Alejandro Dumas (padre), Galois se puso en pie para proponer un brindis: "¡Por Luis Felipe!", dijo, alzando al mismo tiempo su copa y un puñal. A causa de esta acción desafiante fue detenido al día siguiente y encarcelado durante más de un mes en la prisión de Sainte-Pélagie.

En el juicio subsiguiente, la defensa de Galois sostuvo que el brindis había sido: "¡Por Luis Felipe, si traiciona!" pero que la frase "si traiciona" había quedado ahogada por el clamor de los comensales. No se sabe si los jurados se creyeron este alegato o si se conmovieron por la juventud de Galois, quien contaba entonces 19 años; lo cierto es que le absolvieron en pocos minutos. Sin embargo, en el Día de la Bastilla, el 14 de julio de 1831, menos de un mes después de su absolución, Galois fue nuevamente detenido, esta vez por vestir ilegalmente el uniforme de la Guardia de Artillería. Considerado amenaza para el trono, este cuerpo había sido disuelto; el gesto de Galois fue por consiguiente un acto de desafío. Esta vez, durmió ocho meses en Sainte-Pélagie.

La permanencia en prisión tuvo sobre Galois efectos devastadores, quien pasaba del más profundo desaliento a la ira ciega. Raspail, que estaba cumpliendo sentencia al mismo tiempo, recordó más tarde que en cierta ocasión, estando Galois bebido, había pretendido suicidarse. Posteriormente, según Raspail, Galois le confió una deprimente visión del fin de sus días: "Moriré en duelo a causa de alguna coquetuela sin valor [quelque coquette de bas étage]. ¿Por qué? Porque ella me pedirá vengar su honor, que algún otro habrá puesto en entredicho." Con ocasión de la muerte, de un tiro, de un compañero de prisión, parece que Galois acusó al superintendente de la cárcel de haber amañado el incidente. Galois fue entonces encerrado en celda de castigo, quizás a consecuencia de la acusación.

Pese a todas estas calamidades, quizás el peor golpe para Galois fuera ver su trabajo de 1831 rechazado por la Academia. En el acerado prefacio de sus memorias, que escribió estando en prisión, declaraba: "A nadie digo que cuanto en mi trabajo pueda haber de valioso se debe a su estímulo y consejo. Nada de esto digo, porque sería mentira."

Los imaginativos han encontrado siempre particularmente fascinante el final de la vida de Galois. Pero los biógrafos se han resistido a aceptar sin más sus propias palabras, a saber, que el duelo era consecuencia de una desavenencia personal, y se han dedicado a buscar la explicación en prostitutas, agentes provocadores y rivales políticos. No existen pruebas que respalden estas conjeturas.

A mediados de marzo de 1832 se le trasladó de Sainte-Pélagie a la casa de salud Sieur Faultrier, a causa de la epidemia de cólera que sufrió París. Al parecer fue allí donde conoció a la "infa-

me coqueta". La relación que ambos sostuvieron tuvo que ser de poca duración, y es absurdo sugerir que la muchacha fuese una prostituta o una conspiradora, cómplice en el asesinato de Galois. El epíteto "infame coqueta" ha sido asociado con las palabras "quelque coquette de bas étage", para prestar apoyo a la teoría de la prostituta. Sin embargo, de acuerdo con el relato de Raspail, esta última frase fue pronunciada por Galois un año antes del duelo; puede incluso haber sido invención del propio Raspail. Además, el 25 de mayo, seis días antes de su muerte, Galois menciona en una carta a su amigo Auguste Chevalier el triste fin de un episodio amoroso: "¿Cómo puedo consolarme, cuando, en un mes, he agotado la más rica fuente de felicidad que pueda tener el hombre, cuando la he agotado sin felicidad, sin esperanza, cuando estoy cierto de haberla secado de por vida?"

¿Quién era la mujer? Dos cartas fragmentarias le fueron escritas a Galois en las semanas anteriores al duelo, cartas que hacen pensar en una disputa de carácter personal en la que tomó mayor parte de lo que reconoce. La primera carta comienza: "Por favor, rompamos nuestras relaciones. No tengo ánimo para proseguir una correspondencia de esta naturaleza, aunque me esforzaré en reunir el suficiente para conversar contigo como lo hacía antes de que nada sucediera..." La segunda carta es de contenido semejante, y la primera de ellas lleva la firma "Stéphanie D.". En los manuscritos de Galois, Carlos Alberto Infantozzi, de la Universidad de la República de Uruguay, ha conseguido leer un nombre que Galois había borrado: Stéphanie Dumotel. Un trabajo detectivesco más amplio realizado por Infantozzi ha mostrado que ella era Stéphanie-Félicie Poterin du Motel, hija de un médico residente en Sieur Faultrier. Stéphanie se casaría con un profesor de lengua.

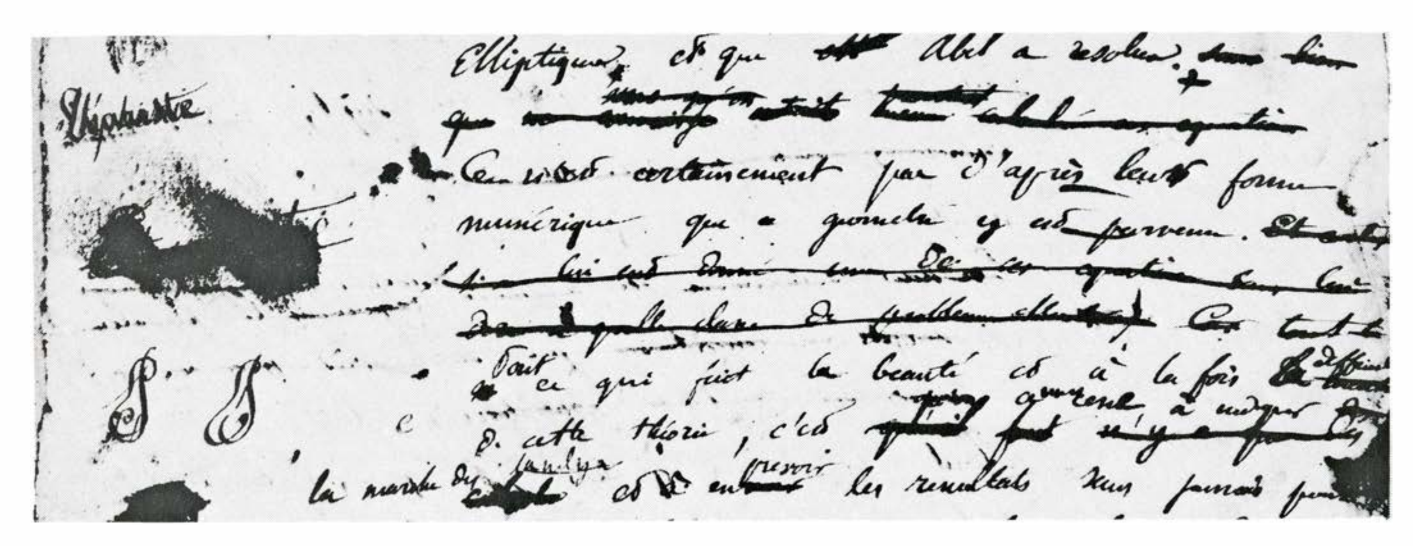
Tampoco es verosímil que el hombre que mató a Galois fuese un agente pagado por alguna conjura antirrepublicana, a pesar de que el hermano de Galois, Alfred, afirmase que Évariste fue asesinado. Según Dumas, el adversario de Galois era Pescheux d'Herbinville, no enemigo político de Galois, sino, como él, ardiente republicano. Más aún, d'Herbinville era uno de los 19 oficiales de la Guardia de Artillería cuya absolución fue ocasión del desafiante brindis que Galois ofreció al rey. Además, cuando tras la revolución de 1848 quedaron al descubierto los agentes de la corona, d'Herbinville no se encontraba entre ellos. Un resumen de un artículo que recientemente me ha enviado Taton indica que el duelo fue entre amigos y que se desarrolló como una especie de ruleta rusa, estando cargada solamente una de las pistolas.

Los escritos matemáticos de Galois en la noche anterior al duelo se redujeron en realidad a corregir la redacción de dos manuscritos y a resumir los contenidos de éstos y de otro artículo en una larga misiva dirigida a Chevalier. El primer trabajo era el rechazado por Poisson; el segundo, una versión fragmentaria de un artículo ya publicado en el *Bulletin* de Férussac. El tercero no ha sido hallado, y su contenido se conoce únicamente por el resumen dado en la carta; al parecer trataba de las integrales de las funciones algebraicas generales.

¿Qué hay de las famosas palabras "No tengo tiempo" que, según se dice, Galois escribió repetidamente, desesperado al verse incapaz de concluir su obra? La frase aparece, en efecto, pero sólo una vez, en una nota marginal de la primera memoria. A ella se añade el comentario: "Nota del autor."

No considero que los hechos relativos a la vida de Galois, en la forma en que yo los he presentado aquí, rebajen en lo más mínimo su talla como matemático. Muchos fragmentos de manuscritos muestran que prosiguió con sus investigaciones matemáticas no sólo durante su encarcelamiento, sino hasta la hora de su muerte. Que fuera capaz de trabajar con provecho en medio de semejante agitación y turbulencia es testimonio de la fertilidad extraordinaria de su imaginación. Prescindiendo por completo de las circunstancias en que se desarrolló su trabajo, no cabe duda de que Galois hizo nacer una de las ideas más originales de la historia de las matemáticas.

Empero, ningún servicio le presta a su reputación, ni a la historia de la ciencia, una leyenda que se empeña en sostener que el genio científico ha de encontrarse por encima de todos los reproches que pueda merecer su vida personal, o que cualquiera de sus contemporáneos que no sepa reconocer su talento ha de ser un necio, un asesino o una prostituta. La idea de que el genio resulta intolerable a los mediocres está demasiado manida, es un lugar común demasiado trillado como para aceptarlo como verdad histórica a pies juntillas. Desde semejante punto de vista sería necesario reconocer a un genio como tal cuando, puesto en pie, blande un cuchillo en un banquete.



LA "INFAME COQUETA" a quien Galois culpa de sus desgracias en una carta escrita la noche anterior al duelo era seguramente la misma mujer cuyo nombre aparece con frecuencia en los márgenes de los papeles de Galois. En el manuscrito reproducido arriba, por cortesía de la Bibliothèque de l'Institut de France, puede leerse el nombre "Stéphanie" por debajo del nombre "Évariste"; Galois combinó también las iniciales "S" y "E" formando con ellas un anagrama. Por ciertas cartas y otros manuscritos resulta claro que el áspero epíteto de Galois fue provocado por un desdichado lance amoroso con una mujer que conoció uno o dos meses antes del duelo, y que ha sido identificada como Stéphanie-Félicie Poterin du Motel, hija de un médico de París.

Temas metamágicos

La música de Frédéric Chopin configura bellas formas auditivas que también sorprenden al ojo

Douglas R. Hofstadter

Las formas gráficas, abstractas, que corren al pie de estas dos páginas son reflejo de los ocho primeros compases de una de las piezas pianísticas de mayor lirismo y dificultad jamás compuestas, el Estudio n.º 11, en la menor, Opus 25, de Frédéric Chopin, escrito hacia 1832, cuando el músico contaba apenas 20 años. Siendo poco más que un niño, muchas veces escuché los estudios de Chopin en el tocadiscos de mi casa paterna, y pronto llegué a entusiasmarme con ellos. Tan familiares llegaron a serme como las caras de mis amigos; tanto, que no soy capaz de imaginar quién sería hoy yo de no haber conocido esas piezas.

Algunos años después, mozalbete estudiante de piano, quise aprender a tocar algunos de estos viejos amigos. Me dirigí a la tienda de música de mi localidad y encontré un álbum con sus partituras. Nunca olvidaré mi reacción al abrir los pliegos y buscar a mis amigos. ¡No estaban por ninguna parte! Lo único que vi fue una masa de acordes y notas negras: pautas visuales complejas e imponentes, formas que jamás imaginé. Fue como si esperando reunirme con viejos camaradas me hubiera en cambio tropezado con sus esqueletos, con la mueca de sus calaveras. Fue pavoroso. Cerré el álbum y me fui, un poco sobresaltado todavía.

Recuerdo que volví varias veces más a la tienda de música, empujado siempre por la misma curiosidad salpicada de temor. Un día hice acopio de valor y me decidí a comprar el álbum de estudios. Imagino que esperaba que, sentándome al piano e intentando tocar las notas que viera, volvería a encontrar a mis amigos, aunque interpretados más despacio. Desdichadamente, no sucedió nada por el estilo. Para empezar, ni siquiera era yo capaz de tocar cómodamente con ambas manos y, no digamos ya, de recrear los sonidos que tan bien conocía. Me sentía desalentado y amedrentado al comprender las pavorosas dificultades que yo había dado por resueltas. Podemos considerarlo de dos formas. Una, admirarnos de cómo la percepción humana es capaz de integrar un enorme conjunto de elementos independientes y "oír" solamente una única cualidad; la otra es admirarnos de la increíble habilidad del pianista capaz de tocar tantas notas, tan rápidamente, que todas ellas se funden en una masa rutilante, en una totalidad coherente.

Mucho me chocó al principio que "los amigos" tuvieran anatomías de tan abrumadora complejidad. Ahora, en retrospectiva, no sé qué esperaba yo.



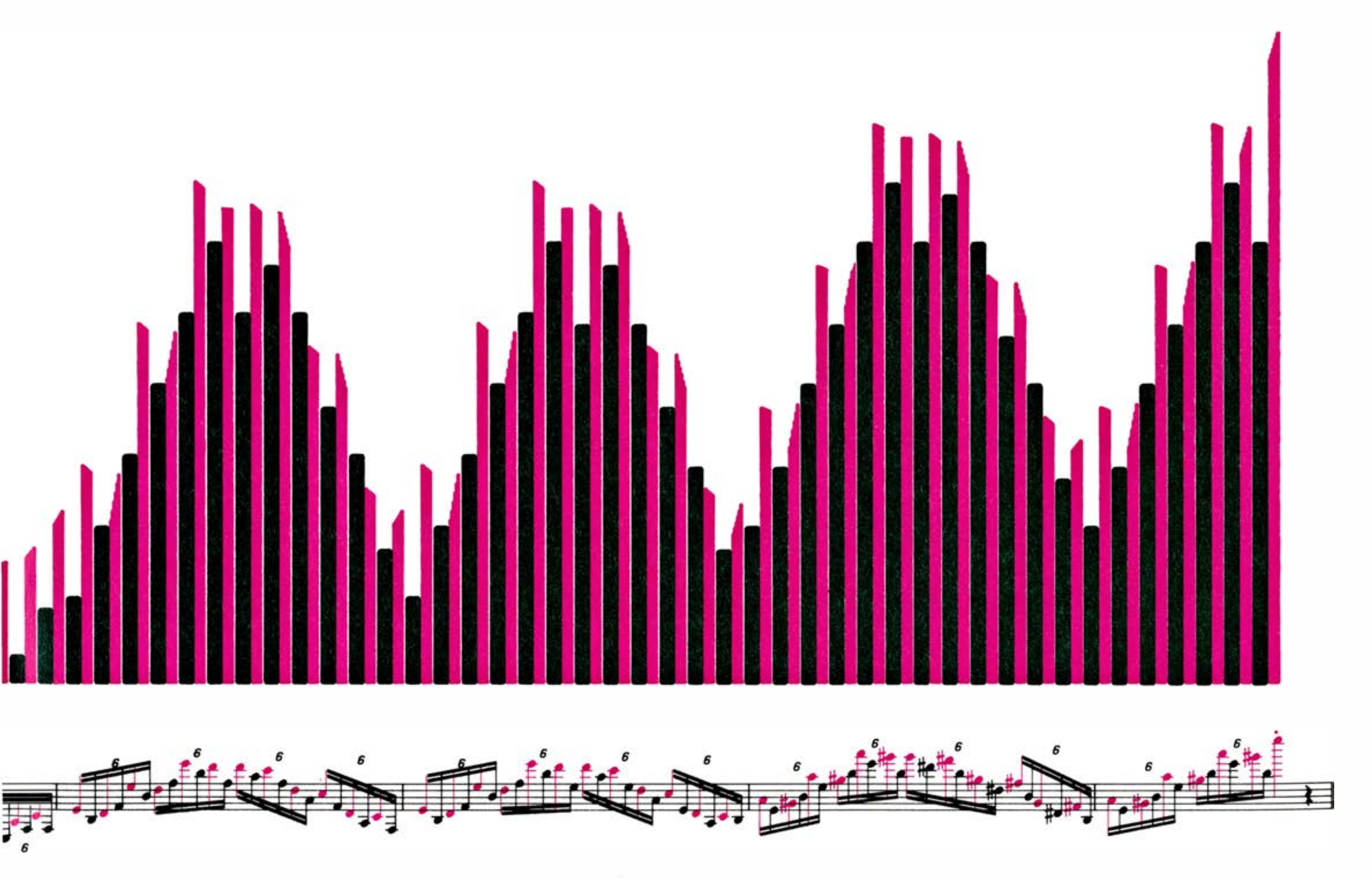
Comienzo del Estudio n.º 11, Opus 25 de Chopin. La partitura (**abajo**) *fue impresa gracias a un programa de ordenador*

¿Acaso confiaba en que unos cuantos acordes sencillos pudieran suscitar la mágica sensación que había sentido? No; si lo hubiera reflexionado un poco me habría dado cuenta de que era cosa imposible. La explicación del origen de tal impresión mágica únicamente podía encontrarse en alguna clase de complejidad, de complejidad estructurada, desde luego. Creo que esta experiencia me enseñó una lección para el resto de mis días, a saber, que los fenómenos percibidos como mágicos son siempre resultado de complejas pautas de actividades no mágicas que se desarrollan a niveles subyacentes al perceptible. Dicho de otra forma, la cualidad mágica subyacente a lo mágico es la estructura. La existencia misma de la vida nos sirve de ejemplo perfecto: la vida emerge de actividades estructuradas, pero desprovistas de vida, que tienen lugar a nivel molecular. La magia de la música emerge de estructuras complejas, de pautas no-mágicas –¿tal vez "metamágicas"?– de notas y acordes.

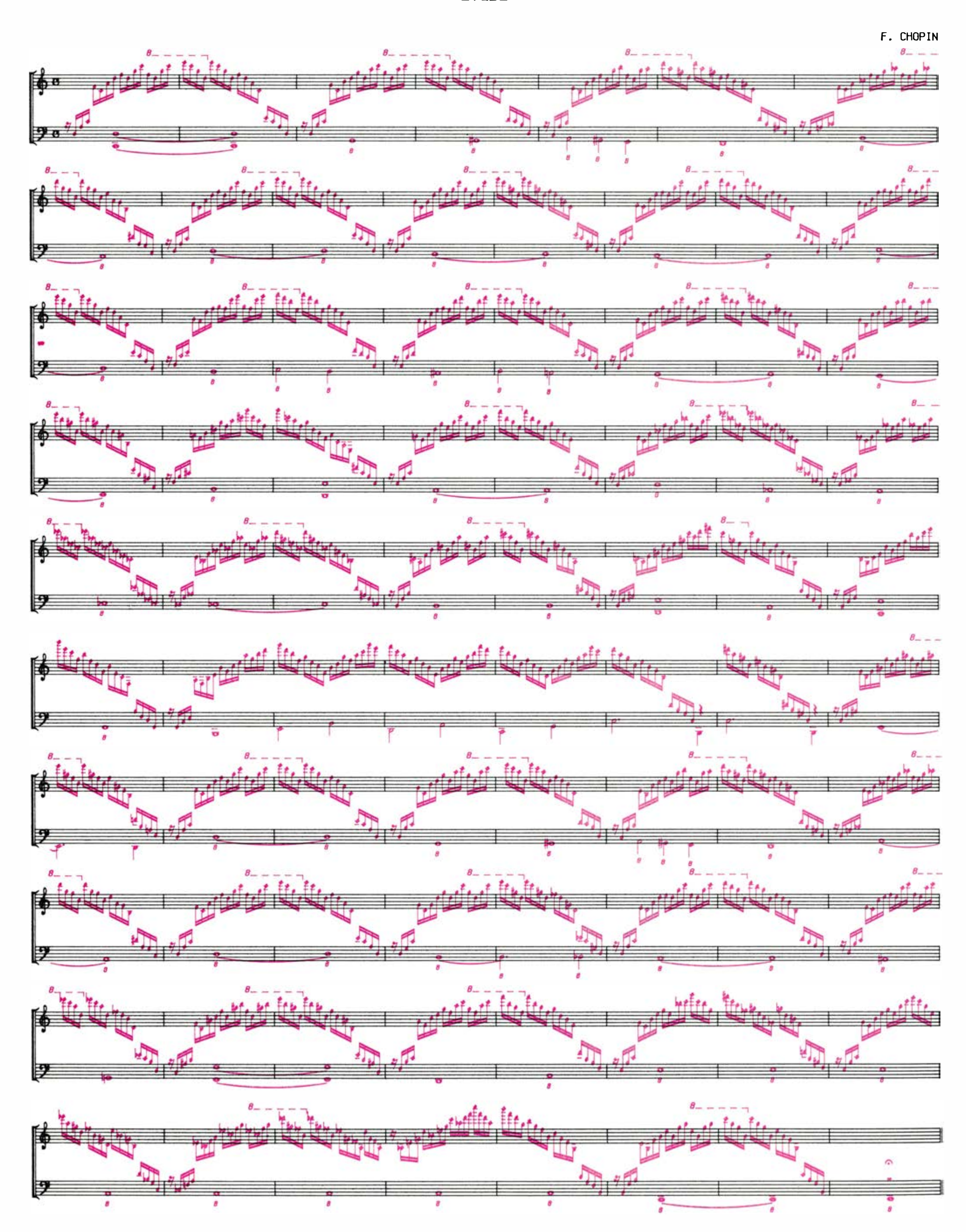
Habiendo adquirido el volumen me sentía arrastrado hacia él. Quise explorarlo costase lo que costase. Tomé la determinación de aprender un estudio, por ardua y trabajosa que resultase la tarea. Elegí el que por entonces era mi favorito –que vemos en la figura– y me dispuse a aprender de memoria las posiciones de los dedos de la mano derecha correspondientes a algo así como un par de páginas. Toqué estas pautas miles de veces, literalmente, y gradualmente mis dedos fueron encontrándolas más naturales, aunque jamás tan naturales como a mis oídos –o mejor, a mi mente– le habían sonado.

Fue entonces cuando por primera vez aprecié la sutileza maravillosa de la relampagueante interpretación de la mano derecha, que consta de dos componentes nítidamente diferenciados: las notas de numeración impar (que vemos en color tanto en el gráfico de barras como en la notación musical situada bajo él) van trazando una perfecta escala cromática descendente a lo largo de cuatro octavas, mientras las notas de numeración par (en negro) encajadas entre aquéllas como las barras de una verja, dictan un arpegio de notas repetidas. Para ejecutar esta pauta alternante la mano derecha revolotea sobre el teclado, saltando de lado a lado como una golondrina en vuelo, batiendo alternativamente sus alas.

Dos palabras de aclaración. En el piano, entre cada nota y su correspondiente en la octava inmediata se intercalan doce notas (algunas con teclas blancas; otras, negras). Al ir tocándolas todas por orden se crea una escala "cromática", distinta de la escala diatónica ordinaria (por lo general en modo mayor o menor), que nos es más familiar; las escalas diatónicas contienen sólo siete notas cada una (siendo la octava la nota que en la misma progresión ocuparía el octavo lugar). Los siete intervalos sonoros definidos por las notas consecutivas de una escala diatónica no son todos iguales; algunos son de tamaño doble que otros. No obstante, el oído los encuentra de una lógica intuitivamente perfecta. Resulta bastante paradójico que casi todo el mundo pueda entonar una escala mayor sin dificultad, pese a la desigualdad de sus intervalos; en cambio, pocos logran dar con precisión una escala cromática, que "debiera" ser mucho más fácil al ser todos sus intervalos de amplitud exactamente igual. La escala cromática recibe su nombre a causa de que las notas supernumerarias introducidas para llenar los lapsos de la escala diatónica tienen un "mordiente", una tersura especial



Las barras coloreadas del gráfico muestran los altos y bajos de las notas impares; las negras corresponden a las notas pares



El Estudio n.º 1, del Op. 10, en do mayor, con sus oleadas en fase

que presta colorido y sentimiento a las piezas musicales. Por esa razón, las obras que, además de las siete notas habituales, emplean otras, se dice que son piezas cromáticas.

Un arpegio es un acorde roto, que se toca una o varias veces consecutivas, subiendo o bajando por el teclado. Guarda pues cierta semejanza con una escala expandida; algo así como si se subiera una escalera saltando los peldaños de tres o cuatro cada vez. La música de Chopin está repleta de arpegios y de pasajes cromáticos; la intrincada fusión y conjunción de ambos elementos en el Estudio 11 me llamó la atención, pareciéndome obra maestra de originalidad e ingenio. Y lo más sorprendente es cómo se la percibe cuando la obra avanza rápidamente. La escala cromática se escucha alta y nítida, formando a modo de "envoltura" lisa de la pauta musical (que también el ojo percibe), pero el arpegio la difumina en una especie de niebla armónica que afecta profundamente la propia percepción, aunque sea subliminalmente, o, al menos, así le parece al oído poco educado.

Cada uno de los Estudios del álbum que compré presenta una textura, un aspecto visual característico. Al principio, ésta era una de las cosas que más me llamaba la atención. No estaba yo habituado a la idea de que la música escrita ofreciera textura; las piezas sencillas que hasta entonces había tocado eran piezas lentas, donde las notas podían escucharse inconfundiblemente, una por una. Dicho de otra forma, eran piezas de grano grueso, incomparablemente más que la fina granulación de los estudios de Chopin, donde las notas casi se pierden en una especie de ilusión acústica. Al traducir este tipo de experiencias auditivas a la notación musical es frecuente que se produzcan configuraciones y pautas de textura muy llamativa. Cada compositor tiene un conjunto de pautas características, cuyo aspecto termina haciéndosenos familiar; y los Estudios me hicieron caer, no sin admiración, en la cuenta de tal hecho.

Con pena me vi obligado a abandonar al Estudio n.º 11 del Op. 25 tras haber aprendido poco más de una página. Sencillamente, era demasiado difícil para mí. Uno de los primeros biógrafos de Chopin en lengua inglesa, James Huneker, crítico musical norteamericano, dijo de este Estudio: "Los hombres de alma pequeña no deberían medirse con él, por muy ágiles que sean sus dedos". Bueno, no estoy seguro del tamaño de mi alma, desde luego mis dedos no eran lo bastante ágiles. Durante algún tiempo ello me indujo a dejar en paz a Chopin. Años más tarde, sin embargo, trabajando yo un poco más seriamente en perfeccionar mis modestas habilidades pianísticas, me tropecé con un Estudio de Chopin suelto en un álbum de piezas de dificultad media. Resultó ser uno de los tres que compuso más tardíamente, ninguno de los cuales se encontraba en la colección de mis padres. ¡Fue un auténtico hallazgo! Afortunadamente para mí su textura parecía menos espinosa, su ritmo, menos prohibitivo. Con cierta cautela fui tocándolo muy lentamente de principio a fin, descubriendo su asombrosa belleza, y no tan inaccesible como otros que yo había intentado.

Al igual que los demás estudios de Chopin, éste se centra en un aspecto técnico particular; si bien, darle primariamente tal enfoque a los Estudios sería como considerar las proezas gimnásticas de Nadia Comaneci como meros ejercicios de puesta a punto. Louis Ehlert, un musicólogo del siglo pasado, escribió acerca de uno de los más hermosos estudios del Opus 25 (el sexto, en sol sostenido menor): "Chopin no sólo versifica un ejercicio en terceras, sino que lo transforma en una obra de arte tal que, al estudiarlo, menos cuesta imaginarse en el Parnaso que recibiendo una lección. Chopin despoja de todo andamiaje mecánico cada pasaje, elevándolo y convirtiéndolo en el cuerpo de un hermoso pensamiento, que a su vez encuentra grácil expresión en su movimiento". Otro tanto vale para el estudio a que me refiero, en la bemol mayor, publicado póstumamente, cuya principal preocupación técnica es la noción de "tres contra dos", caso particular de la noción de polirritmo.

Matemáticamente hablando se trata de una noción bastante simple: se interpretan simultáneamente dos pentagramas, uno de los cuales contiene tres notas por cada dos del otro. Generalmente, los grupos de tres y de dos notas están alineados con objeto de hacerlos comenzar al mismo tiempo. Al representarlos ambos sobre un intervalo unidad vemos que la segunda nota del grupo de dos se ataca a medio camino entre la segunda y tercera notas del grupo de tres. Evidentemente no hemos hecho sino enunciar que 1/2 es media aritmética de 1/3 y 2/3:

1.ª voz: (triplete)
0 1/3 2/3 1

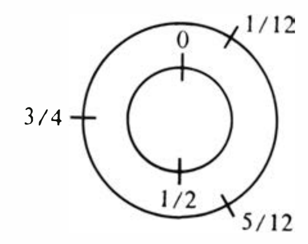
0 1/2 1
2.ª voz: (doblete)

En teoría, en los ritmos múltiples "tres contra dos" no es preciso que las voces estén rigurosamente alineadas. Desfasando la voz superior en 1/12, pongamos por caso, hacia la derecha, resulta otra figura diferente:

1.ª voz:
1/12 5/12 3/4 13/12

0 1/2 1
2.ª voz:

Aquí la tercera nota del grupo de tres arranca en medio de la segunda del de dos. Como puede verse, la terna alcanza más allá del extremo del intervalo temporal, presumiblemente para enlazar con otra idéntica. Podemos conectar los extremos de este motivo, y expresar mediante círculos su carácter periódico:



Haciendo girar una cualquiera de estas circunferencias concéntricas a modo de botón de mando tendremos todas las posibles formas de escuchar tres tiempos contra dos. De todas maneras, en Chopin y en casi toda la música occidental, entre todas las posibilidades la única explotada es con grupos de tres y de dos exactamente "en fase".

Al principio me resultaba difícil ejecutar exactamente el ritmo tres contra dos. Es preciso aprender a escuchar las voces por separado, a oír el aire vivaz y animado del ritmo ternario entretejiéndose en la malla cuadrada que va dibujando el ritmo binario. No hay dificultad en oírlos cuando la interpretación es de otros; en la propia ya es otro cantar. En principio no es tarea difícil; sólo requiere coordinación y práctica. Descubrí que una vez dominado el problema de tocar uniforme e independientemente ambos ritmos podía hacerlo también con el estudio completo. Al interpretarlo –o escucharlo– nos sentimos como sonriendo entre lágrimas; tan hermoso y triste es al mismo tiempo.

Inútil decirlo, es imposible localizar en concreto la fuente de tal belleza, pero sin duda se debe en parte a la forma que tienen los acordes de la mano derecha de confluir uno en otro. A lo largo de casi toda la pieza, la mano de-



Ritmo ternario y binario enfrentados en el Estudio en la bemol mayor

recha va trazando acordes de tres notas (seis por compás) frente a dos notas simples que pulsa la mano izquierda (cuatro por compás). Con frecuencia, al fluir un acorde en el siguiente tan sólo cambia una nota; ello presta al estudio una especial delicadeza. Para mayor sutileza de este motivo lentamente cambiante, los pasos que va dando la voz variable suelen ser unitarios, de una nota a otra inmediata. Es obvio que tales "reglas" no se observan de principio a fin; hay numerosas excepciones. Empero, la pieza presenta una estructura auditiva que la imbuye de suave melancolía, de la que en polaco llaman *tęsknota*.

Puede ser interesante especular hasta qué punto se planteó Chopin consideraciones formales de este tipo al tiempo de componer. Es bien sabido que Chopin veneraba la música de Bach. "Toque siempre Bach", fue el consejo que dio a un discípulo. Particular devoción le merecía El Clavecín Bien Temperado, paradigma de elegancia formal. Chopin le confió a un amigo suyo, el pintor Eugène Delacroix, que "la fuga es, en música, lógica pura... Conocer a fondo la fuga equivale a familiarizarse con el elemento de toda razón y coherencia musical". No cabe duda de que Chopin amaba la estructura.

Una sorprendente demostración de la extrema atención que Chopin prestaba al efecto visual producido por las texturas de sus estudios nos la proporciona el manuscrito de su estudio Opus 10, n.º 1, en do mayor, del que Huneker escribió con su prosa inimitable:

"Las negras e irregulares escalinatas de notas ascendentes y descendentes infunden pavor al neófito. Al igual que los maravillosos sueños de arquitectura aérea de Piranesi, estas vertiginosas cascadas y laderas de Chopin ejercen su encanto, hipnótico si se quiere, tanto sobre la vista como sobre el oído. He aquí la nueva técnica en su total desnudez, nueva en figura, diseño, estructura, trama, nueva en el modo armónico. El viejo orden se horroriza ante la aspereza modulatoria; el joven brota de lo nuevo, fascinado y un poco amedrentado. A un hombre que bien pudiera hacer detonar una mina capaz de acometer a las estrellas es preciso tomarle en cuenta."

Ese neófito he podido muy bien ser yo mismo. Las palabras de Huneker contrastan con lo que el joven Chopin, a los 19 años, escribió de éste su primer estudio en una carta a su amigo Tytus Woyciechowski, en 1829: "He compuesto un largo ejercicio sobre forma, en mi propio estilo; cuando nos reunamos te lo mostraré". Una copia terminada, según se cree de puño y letra de Chopin, se encuentra ahora en el Museo de la Sociedad Frédéric Chopin, en Varsovia. En vista de las circunstancias por las que hoy atraviesa Polonia, sería difícil reproducirla directamente. Afortunadamente, Donald Byrd, de la Universidad de Indiana, ha preparado un programa de ordenador capaz de imprimir música según se le especifique. Con su maravilloso programa, y la ayuda de Adrienne Gnidec y mía, Byrd ha impreso la música de forma que reproduzca las estructuras visuales de gran escala del propio manuscrito de Chopin, quien tuvo gran cuidado en dejar alineadas todas las crestas de las masivas olas. Al interpretar la pieza a velocidad adecuada, cada uno de los flujos y reflujos arriba y abajo del teclado se perciben como una poderosa oleada, como el alazo de un águila, con las notas de cada cresta fulgurando brillantemente, como las puntas de las remeras refulgiendo al sol.

Otro rasgo interesante de la notación de Chopin, que reproducimos aquí, es su forma de situar las redondas de la octava baja. En lugar de situarlas al principio de cada compás, alineadas con el resto de semicorcheas, Chopin las coloca en el centro del compás, creando así un elegante equilibrio visual, aunque a costa de cierta claridad notacional. Desde el punto de vista musical, el centrado carece de importancia. Puesto que una redonda tiene la duración de un compás de 4/4, es preciso atacarla al comienzo del compás; de lo contrario desbordaría su medida y entraría en el compás siguiente, y eso es imposible. O mejor dicho, infringiría una regla de notación musical mucho más estricta, a saber, que ninguna nota puede designar sonidos que desborden los límites de su compás. Por tanto, la única interpretación posible es que la redonda se ataque al principio. Dicho de otro modo, el centrado es tan sólo un exquisito toque artístico de añejo sabor decimonónico, algo así como la ornamentación de los edificios victorianos. En tiempos modernos, el ojo musical está habituado a una notación más funcional, al leer el pentagrama espera ver en él un gráfico de sonidos, siendo el tiempo el eje horizontal. Por tanto, espera que las notas que se atacan simultáneamente queden alineadas sobre una misma vertical.

Volvamos, sin embargo, al tema de la atención que Chopin prestaba a forma y estructura. Pocos compositores de la era romántica han escrito páginas musicales tan organizadas en su aspecto visual; pocos han tejido todo un tapiz partiendo de una sola idea sobre su textura. Debe quedar claro, no obstante, que la preocupación de Chopin por ajustarse a una pauta estricta nunca aventajó al ansia de expresar emociones sentidas de corazón. Es preciso distinguir, me parece, entre la "pauta cerebral" y la "pauta afectiva", o con vocablos de apariencia más objetiva, entre pauta sintáctica y pauta semántica. En música, la noción de pauta sintáctica se corresponde con las construcciones estructurales formales empleadas en poesía: aliteración, rima, metro, repetición de sonidos, etcétera.





El Estudio n.º 2, Op. 25 fue escrito en tresillos (**arriba**) *pero puede interpretarse en grupos de dos* (**abajo**)

La noción de pauta semántica es análoga de la pauta o motivo temático subyacente al poema, y que le da razón de existir. En dos palabras: la inspiración. Que en música existen pautas de esa naturaleza es tan innegable como que hay cursos sobre teoría de la armonía. Y sin embargo, la teoría armónica no ha tenido más éxito a la hora de explicar tales pautas de lo que ningún sistema haya podido tener en plasmar en un conjunto de reglas la esencia de la creatividad artística. Hay palabras para describir pautas y progresiones correctamente formadas, pero ninguna de las teorías hasta hoy creadas ha llegado ni siquiera a aproximarse a definir una criba semántica lo bastante fina como para dejar que todas las malas composiciones la atraviesen y ser capaz de retener todas las buenas. Las teorías acerca de la calidad musical siguen siendo descriptivas y no generativas; consiguen hasta cierto punto explicar en retrospectiva por qué una composición parece buena, pero no capacitan a nadie para crear nuevas obras de calidad e interés. A pesar de todo, resulta fascinante y, para algunos, compulsivo sin más, intentar descubrir ciertos distintivos de la grandeza, tratar de comprender *por qué* la música de un compositor alcanza a conmover nuestro fuero más íntimo, mientras la de otro nos deja indiferentes. Es un misterio.



La Balada en fa menor porta en cada cuarta nota rabillos (**color**), *como gallardetes al viento*

Tras aprender el estudio póstumo en la bemol me sentí con fuerza para abordar alguno de los demás. Uno de los que más me habían gustado siempre era el Opus 25, n.º 2, en fa menor. Para mí era un manso y apresurado murmullo de notas, un trémulo aleteo, como las hojas de un álamo agitadas por una brisa suave. Empero, no era exactamente una escena campestre lo que yo veía en él; más bien expresaba un ansia humana, una melancolía transida de extraños e indómitos anhelos de algo desconocido y remoto, de *tęsknota*, otra vez. Habiéndola escuchado durante muchos años, yo conocía esta melodía del derecho y del revés, y aspiraba a transferirla a mi dedos.

Tras un par de meses de práctica, mis dedos habían adquirido la resistencia suficiente para tocar la pieza suave y tersamente. Muy satisfecho estaba yo de lo alcanzado, hasta que un día una persona amiga para quien yo estaba tocando comentó: "Tú la tocas de dos en dos, y se debe tocar de tres en tres". Me quería decir con esto que al tocar yo acentuaba la segunda de cada dos notas, en vez de la tercera de cada tres. Aturullado, miré la. partitura, y desde luego, como ella decía, la melodía estaba escrita en ritmo ternario. ¡Pero tal vez Chopin no pretendió que fuera interpretada de esta forma! Después de todo, yo conocía la melodía perfectamente. ¿O tal vez no? Pobré a tocarla en grupos de tres. Sonaba extraña, desconocida, con una distorsión perceptual como nunca había yo experimentado antes.

Fui a casa y saqué el viejo disco de mis padres, con los Estudios del Opus 25 (interpretados por un pianista maravilloso, hoy casi olvidado, Alexander Jenner). Puse el estudio en fa menor, esforzándome en escuchar de qué modo lo acentuaba. Descubrí que podía oírlo indistintamente de ambas formas. Jenner lo había tocado con tan gran tersura, tan sin acento (como se dice que hacía Chopin) que en realidad era imposible asegurar cómo lo oíamos. ¡De pronto caí en la cuenta de que yo conocía dos melodías formadas por la misma sucesión de notas! Me sentí muy afortunado porque ahora podría volver a gozar de esa melodía conocida desde antiguo en forma fresca y nueva. Fue como enamorarse de una misma persona por segunda vez.

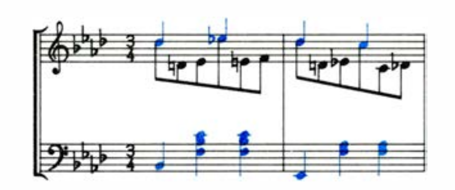
Tuve que practicar mucho para destruir el mal hábito de "biplicidad" y acostumbrarme en cambio a la "triplicidad" señalada en la partitura, pero el esfuerzo fue delicioso. Lo más difícil fue lograr combinar ambas manos. Cuando la mano derecha trazaba pares no había gran problema; todas las notas acentuadas coincidían con notas de la mano izquierda, que se movía a velocidad mitad, dibujando una pauta de amplios arpegios. Pero al querer espaciar más los acentos, señalando solamente la *tercera* de cada tres notas de la mano derecha, resultaba que muchas de las notas de la mano izquierda atacaban simultáneamente a notas débiles de la derecha. Puede parecer bastante sencillo, pero a mí me resultaba sumamente complicado. Vemos la diferencia en la ilustración inferior de la página anterior (que como casi todas las de este artículo ha sido creada con el programa de Byrd).

Me encontré con que a pesar de dominar la partitura de la mano derecha tocada en *solo*, al principio era casi imposible dejar de acentuar suavemente las notas melódicas coincidentes con el bajo. Fue un terrible ejercicio de coordinación que me trajo, sin embargo, grandes goces. Al cabo de un tiempo algo "entró en su sitio" y me encontré capaz de lograrlo. No era cosa que yo pudiera conscientemente explicar o controlar: sencillamente, de pronto empecé a hacerlo bien.

Al comentar este estudio Huneker cita a otro especialista en Chopin, Theodor Kullak, quien menciona el "carácter algebraico del lenguaje tonal" y después añade: "A veces, tan delicado es su diseño que hace pensar en los difuminados y fantásticos trazados de la helada en el cristal".

La música de Chopin está repleta de estos trucos "algebraicos" de ritmo mixto. Parecía recrearse en ellos como ningún compositor hiciera antes que él. Ejemplo famoso es su iconoclasta Vals en la bemol mayor, Op. 42, escrito en 1840. El bajo ejecuta el habitual uúm- - pa - pa del tres por cuatro, pero la melodía de la primera sección contraría por completo este carácter ternario; sus seis corcheas, en lugar de quedar descompuestas en tres pares alineados con los golpes de la mano izquierda, trazan dos grupos de tres –lo mismo que en el estudio en fa menor que he venido comentando– pero aquí, en contraste con el tremular casi átono que se busca en el estudio, las notas iniciales de los sucesivos grupos de tres deben subrayarse y prolongarse claramente, construyendo así una melodía a nivel superior (que vemos en color en la ilustración de la página siguiente) abstraída del murmullo entonado por la mano derecha. Esta melodía está formada a razón de dos notas por compás, que baten regularmente contra las tres notas bajas que marcan el vals. Es un efecto maravillosamente *trompe l'oreille*, del que Chopin volvió a sacar partido en el Scherzo en mi mayor, Op. 54, que escribió en 1842, cuando contaba 32 años.

En ese mismo año Chopin escribió la



La melodía del Vals en la bemol, entonada en grupos de dos (**color**)

que muchos admiradores consideran ser su obra cumbre: la balada n.º 4 en fa menor. La pieza está llena de pasajes dignos de atención, pero uno en concreto tuvo en mí profundo efecto. Hacía mucho que conocía íntimamente la pieza por grabaciones cuando un día un amigo me dijo que había estado practicando un pasaje de curioso polirritmo, francamente interesante. Por entonces no estaba yo particularmente interesado en polirritmos y no presté demasiada atención cuando se sentó al piano. Empezó a tocar. Sólo fueron dos compases, mas para cuando hubo terminado sentí que alguien se había colado en el centro de mi cerebro y había hecho detonar algo allá, profundamente adentro. El "pasaje de curioso polirritmo" me había deshecho por completo. ¿Qué estaba ocurriendo?

Desde luego, mucho más que mero polirritmo, aunque éste aportase su parte. Como podemos ver en los compases representados en la página anterior, la mano izquierda forma amplias y retumbantes olas sonoras, a modo de profundos embates oceánicos, sobre los que navega un velero. Cada ola está formada por seis notas que trazan un arpegio ascendente y descendente. Allá en lo alto, por encima de estas oleadas sonoras se cierne y flota una lírica melodía, que emerge de la confusión de notas que se arremolinan en torno a ella como un halo. La melodía superior y su halo están en realidad fundidas conjuntamente en las 18 notas por compás que ha de atacar la mano derecha. Están escritas en seis grupos de tres, de forma que, en cada medio compás, nueve notas altas baten contra la ola oceánica –de seis notas del bajo de nuevo un claro problema de tres contra dos. Pero fijémonos: ¡en lo alto de las ternas voladoras vemos los rabillos de las corcheas flotando en cada *cuarta* nota! Por tanto, hay un rabillo en la primera nota del primer grupo de tres, en la segunda nota del segundo, en la tercera nota del tercero, en la cuarta del cuarto... Bueno, eso no puede ser. En realidad, el cuarto grupo no lleva rabillos; el rabillo tiene que ir a la primera nota del quinto grupo de tres; a partir de ahí el motivo se repite. Son como gallardetes al viento, izados en los mástiles de un velero.

Esta construcción rítmica de maravillosa sutileza pudiera, y solo digo pudiera, haber sido inventada por cualquiera, por ejemplo, un especialista en teoría del ritmo que careciera del sentido de la melodía. Pero no fue así. Fue ideada por un compositor dotado del más supremo sentido de la melodía, armonía y ritmo, y ello no puede ser coincidencia. Un mero "trota-ritmos" carecería del juicio para saber qué hacer con este ritmo concreto o con otra estructura rítmica cualquiera. Hay en este pasaje algo que da fe del genio verdadero, algo que las palabras solas no pueden definir. Es preciso escucharlo. Es un lirismo ardiente de potencia e intensidad que desafían la capacidad de descripción.

Resulta forzoso preguntarse por el alma de un hombre capaz de escribir a los 32 años música tan poseída, de un hombre que a los 19 años supo componer arrancadas tan poéticas y controladas como los estudios del Op. 10. ¿De dónde pudo salir esta rara combinación de fuerza y organización, de dónde tal seguridad y confianza, tal madurez musical?

Al buscar respuesta debemos revisar las raíces de Chopin, tanto familiares como de su patria natal, Polonia. Chopin nació en una pequeña y pacífica villa campesina a unos 50 kilómetros al oeste de Varsovia, llamada Żelazowa Wola, que significa Voluntad de Hierro. Su padre, Nicolás (Mikołaj) Chopin era francés de nacimiento emigrado a Polonia, convirtiéndose en ardiente patriota (tanto que tomó parte en la insurrección de 1794 contra la ocupación rusa de Varsovia, encabezada por Jan Kiliński). La madre de Chopin, Justyna Krzyżanowska, era pariente lejana de la rica y aristocrática familia Skarbek, que vivía en Żelazowa Wola. Justyna compartía su techo como un miembro más de la familia, y se ocupaba de diversos quehaceres domésticos. Cuando Mikołaj llegó para encargarse de la educación de los niños de la familia Skarbek, conoció a Justyna, y se casaron. Además de madre amorosa y gentil, Justyna era tan ardiente patriota como su marido; tampoco carecía de una vena romántica y soñadora. Tuvieron cuatro hijos, de los cuales Frédéric, nacido en 1810, fue el segundo. Los otros tres fueron niñas, una de las cuales murió muy joven de tuberculosis, enfermedad que habría finalmente de reclamar también a Frédéric, quien falleció a la edad de 39 años. Los cuatro niños se adoraban. En conjunto, Chopin tuvo una niñez muy feliz.

La familia se mudó a Varsovia siendo Frédéric muy joven, donde éste entró en contacto con todas las formas de cultura, pues su padre era profesor y conocía en la universidad a personas de todas las disciplinas. Frédéric fue un muchacho vivo de ingenio, amante de la diversión. El verano de sus 14 años lo pasó fuera de casa, en Szafarnia, un pueblo inundado de lilas. Desde allí escribió a casa una serie de cartas mofándose, burlón, del estilo del *Correo de Varsovia*, diario de la época cargado de comidilla provinciana. Un párrafo de su "Correo de Szafarnia" decía como sigue:

"El Estimado Sr. Pichon [anagrama de Chopin] visitó Golub el día 26 de los corrientes. Entre otras maravillas y curiosidades extranjeras, topóse con un Cerdo extranjero, cerdo que atrajo la atención de este muy distinguido Viajero."

El talento musical de Chopin, que compartía con su madre, afloró muy pronto, y fue educado y alimentado por dos profesores de piano; primero por Wojciech Żywny, un anciano checo amable y bienhumorado, y, más tarde, por el director del Conservatorio de Varsovia, Józef Elsner.

Chopin creció en la capital del "Gran Ducado de Varsovia" –los despojos de Polonia, tras haber sido trinchada en tres "particiones" sucesivas a fines del siglo XVIII por sus tres voraces vecinos, Austria, Rusia y Prusia. La vuelta del siglo estuvo señalada por un fervor nacionalista cada vez más intenso; en Varsovia y Cracovia, las dos principales ciudades polacas, se produjeron una sucesión de insurrecciones contra los invasores, que no produjeron fruto. Cierto número de ardorosos nacionalistas polacos se exiliaron, formando "Legiones Polacas", cuyo propósito era luchar por la liberación de todos los pueblos oprimidos, y eventualmente retornar a Polonia y reivindicarla a las potencias ocupantes. Cuando Napoleón invadió Rusia, en 1806, se formó durante un breve intervalo un estado polaco; después todo volvió a la situación anterior. La llama de la nación polaca fluctuó y vaciló, y casi llegó a extinguirse por completo; pero como proclaman las palabras del himno nacional polaco, "Jeszcze Polska nie zginęła, póki my żyjemy". Es una frase curiosa, construida en tiempos pasado y presente, que traducida literalmente dice "Polonia no ha perecido todavía, en tanto que nosotros vivimos". La primera cláusula tiene un aire fatalista, como si,

inevitablemente, Polonia *fuera* a perecer ¡pero aún no del todo! En realidad, no connota tan gran desesperanza; y una traducción más conforme sería: "Polonia no perecerá, mientras nosotros vivamos".

Los polacos son pueblo que ha aprendido a distinguir claramente entre la idea de sí mismos como nación y la idea de la tierra en que viven. La "nación polaca" representa más un espíritu que una porción de territorio, aunque evidentemente la nación llegó a existir a causa de lazos entre gentes que vivieron en cierta región. Es la fragilidad de esta llama vacilante, y la determinación de mantenerla viva, lo que Chopin refleja en su música con tanto vigor y pureza. Hay una cierta fusión de amargura, rabia y pesar, llamada *żal*, que es exclusivamente polaca. Se la percibe sin duda en las famosas mazurkas y polonesas, piezas que Chopin compuso tomando la forma de danzas nacionales. En conjunto, las mazurkas son piezas menores, basadas en un animado y melodioso ritmo de 3/4; las polonesas son grandiosas, heroicas y de espíritu marcial. Pero la llama ardiente de Polonia refulge también en muchas otras composiciones de Chopin, por ejemplo, en las secciones centrales, lentas, de piezas como los valses en la menor (Op. 34, n.º 2) y en la bemol mayor (Op. 64, n.º 3), el preludio, cargado de patetismo, en fa sostenido mayor (Op. 28, n.º 13), y de manera particular, en la sección central de la polonesa en fa sostenido menor (Opus 44), donde un rayo de esperanza destella entre oscuras visiones, como una chispa en las tinieblas. Oímos *żal* en las ásperas y zumbantes armonías del estudio en do sostenido menor (Opus 10, n.º 4) y en la pasión del estudio en mi mayor (Op. 10, n.º 3). Se dice, en efecto, que, al ser tocada esta pieza en su presencia, Chopin gritó "Ô ma patrie!".

Pero, aparte el ferviente patriotismo de la música de Chopin, hay también

Op. 10, n.º 11 (mi bemol mayor)



Op. 25, n.º 1 (la bemol mayor)



Op. 25, n.º 2 (fa menor)



Op. 25, n.º 3 (fa mayor)



Op. 25, n.º 6 (sol sostenido menor)



Op. 25, n.º 12 (do menor)



Seis páginas de otros tantos Estudios de Chopin, que muestran la notable variedad de sus pautas visuales

en ella esa otra clase de nostalgia polaca, diferente y más dulce: *tesknota*. Es el anhelo que siente del hogar –del hogar de su infancia, de su familia, de una Polonia ensoñada que abandonó para siempre a los 20 años. En 1830, en el clímax de la revuelta de Varsovia, Chopin partió hacia Francia. Tenía la premonición de que jamás retornaría. Viajero de paso por Viena, hizo lentos progresos. En el momento en que las cosas se pusieron al rojo, cuando en septiembre de 1831 los rusos aplastaron finalmente la desesperada insurrección de Varsovia, Chopin se encontraba en Stuttgart. Al saber la noticia quedó abrumado de angustia y aflicción, en parte, temiendo por la suerte que hubiera podido correr su familia, en parte, por amor a su patria sojuzgada. Estuvo a punto de retornar a Polonia y luchar por su nación, pero al final abandonó la idea.

Fue aproximadamente entonces cuando compuso el duodécimo y último estudio de su Opus 10. De este estudio, el biógrafo polaco Maurycy Karasowski escribió: "Dolor, ansiedad y desesperación por la suerte de los suyos y la de su padre entrañablemente amado colmaban el cáliz de sus sufrimientos. Embargado por estas emociones escribió el estudio en do menor, que muchos han llamado 'Estudio Revolucionario'. Del alocado y tempestuoso huracán de pasajes de la mano izquierda va alzándose la melodía, ora apasionada, ora henchida de altivez majestuosa, sintiéndose el oyente estremecido de reverente temor, mientras ante él se evoca la imagen de Zeus tonante, lanzando relámpagos al mundo."

Son palabras muy fuertes. Huneker se hace eco de estos sentimientos, al igual que el pianista francés Alfred Cortot, quien, en su famosa edición para estudiantes de los Estudios, alude a la pieza como un "exaltado alarido de rebelión... en el que están vivas y laten con fuerza las emociones de una raza entera". Por mi parte, nunca he encontrado este estudio tan arrebatado como afirman estos dos autores, aunque incuestionablemente sea un estallido emocional de gran potencia. Si alguien me hubiera dicho que uno de los Estudios había llegado a ser conocido como "Revolucionario", y me pidiese que conjeturase cuál, casi seguramente habría elegido uno de los dos últimos del Opus 25, el n.º 11 en la menor, reproducido al principio del artículo, con sus tumultuosas cascadas de notas en la mano derecha enfrentadas a la agitada y heroica melodía de la izquierda, o el n.º 12 en do menor, que a mis oídos suena como un infierno incandescente visto de noche desde lejos, fulgurando hacia lo alto, impredictible e imponente. Con respecto al "Estudio Revolucionario", siempre me ha parecido tener un final enigmático, fluctuando entre mayor y menor, modulando entre fa y do, una especie, diría, de trueno indeciso.

Empero, esta pieza, lo mismo que la marcial polonesa en la bemol mayor (Opus 53) se ha convertido en símbolo del trágico, aunque heroico, destino de Polonia. Todas y cada una de las veces que un polaco la escucha, su corazón late más fuerte, y su espíritu se conmueve profundamente. Nunca olvidaré cómo la oí una noche, auténtico clarín de Polonia, al sintonizar Radio Varsovia desde Alemania. Dos compases de acordes penetrantes y vehementes, como una llamada a las armas, repetidos una y otra vez como señal de sintonía, servían de preámbulo a una emisión de música de Chopin. Tampoco olvidaré cómo la débil señal de Radio Varsovia se desvanecía y retornaba, símbolo de la vacilante llama del espíritu de Polonia.

No importa cómo se prefiera describirla –sea como *żal* y *tęsknota, patriotyzm* y polirritmo, sea de cromatismos y arpegios– la música de Chopin ha ejercido influencia profunda sobre los compositores de generaciones más tardías. Quizá se note más claramente esta influencia en la obra pianística de Alexander Scriabin, Sergei Rachmaninoff, Gabriel Fauré, Felix Mendelssohn, Robert y Clara Schumann, Johannes Brahms, Maurice Ravel y Claude Debussy, pero la música de Chopin ha calado más hondamente de lo que incluso estos nombres pueden sugerir. Se ha convertido en una de las columnas centrales de la música occidental, y como tal, causa efecto sobre la música creada o percibida por cada miembro de nuestra cultura.

En cierta forma la música de Chopin es puramente polaca, y ese carácter –*Polskność*– se extiende hasta piezas suyas de tema foráneo, como el Bolero, la Tarantella, la Barcarola, etcétera. Mas en otro sentido su música es universal, tanto así que incluso sus piezas más profundamente polacas –las mazurkas y polonesas– hablan a un conjunto de emociones que todos sentimos. ¿Qué emociones son esas? ¿Cómo pueden ser evocadas desde tan adentro por la mera estructura musical? ¿Cuál es el secreto de la música de Chopin? No conozco ninguna cuestión más candente.

Taller y laboratorio

"Moscas volantes": formaciones de glóbulos sanguíneos que aparecen en el campo visual

Jearl Walker

Las "moscas volantes" que se nos aparecen al fijar la vista sobre un fondo monótono se inscriben entre los fenómenos endoópticos, aludiendo a su origen en el interior del sistema visual. La observación de las moscas volantes reviste bastante interés, por cuanto revelan aspectos muy interesantes acerca de los mecanismos del sistema visual.

Según mi experiencia personal, posiblemente similar a la del lector, cuando miro con fijeza un fondo monótono, como puede ser una pared desnuda o un cielo despejado, el campo visual parece salpicarse de pequeños círculos y otras figuras mayores de forma capilar. No hay manera de enfocar unos y otras. Y si uno pretende adaptar la vista para así observar mejor alguna de tales figuras, el objeto desaparece en un revoloteo.

Hacer caso omiso de los pequeños círculos no cuesta esfuerzo. Otra cosa es realizarlo con los objetos mayores. En el campo visual de mi ojo derecho suelo observar una estructura que se asemeja a una cuerda tensa anudada varias veces y con los cabos sueltos. Dicha estructura adquiere, a veces, un tamaño tal que me impide leer. Llego a verla incluso sobre un fondo complicado. Cuando éste es la página de un libro, el objeto es oscuro. Sobre la pantalla de un ordenador, que ofrece un fondo oscuro y donde los caracteres relucen, el objeto se presenta como una zona blanca borrosa. También se me aparece al cerrar los ojos ante una fuente de iluminación intensa, como un cielo resplandeciente.

En el *Tratado de óptica fisiológica*, de Hermann von Helmholtz, se encuentra uno de los mejores estudios iniciales acerca de las moscas volantes. En junio de 1962, Harvey E. White y Paul Levatin publicaron en SCIENTIFIC AMERICAN un artículo en el que interpretaban las moscas volantes en términos de física moderna. Gran parte de lo que sigue se basa en las ideas expuestas en ese artículo.

Aunque las moscas parezcan encontrarse en la superficie de la córnea, la verdad es que se hallan próximas a la retina y deambulan por el líquido que hay inmediatamente delante de la fóvea, pequeña zona donde es máxima la agudeza visual y mayor la densidad de fotorreceptores. La fóvea (o el lugar que ésta ocupa en el campo visual) recibe a veces el nombre de punto de fijación.

Los causantes de las moscas son glóbulos rojos escapados de la retina, los cuales, una vez desprendidos, se hinchan en forma esférica perdiendo la hemoglobina y, por tanto, el color rojo. Estas esferas vagan a la deriva, solas o en ristras, por la zona de líquido situada delante de la fóvea. Los glóbulos solitarios son la causa de los pequeños círculos; las ristras, de las formaciones capilares. El objeto que observo con el ojo derecho semeja un rosario larguísimo formado por unas 70 células. Aunque podría equivocarme, ya que varias ristras cortas y enmarañadas ofrecerían la misma apariencia.

El diámetro de un glóbulo rojo ya hinchado es de unos ocho micrometros. Las moscas volantes, empero, no son imágenes directas de dichas células, ni siquiera su sombra, habitualmente. En la mayoría de las ocasiones constituyen las figuras de difracción que arroja cada glóbulo sobre la retina. Cada figura se compone de franjas claras y oscuras originadas por la interferencia constructiva y destructiva de la luz que se cruza con el glóbulo camino de los fotoreceptores de la retina. Cuando se trate de un glóbulo aislado, la figura se compondrá de anillos concéntricos claros y oscuros; cuando se trate de varios glóbulos eslabonados, aparecerá una figura alargada.

La capa líquida por la que deambulan los glóbulos resulta de una licuación parcial del humor vítreo, que es la sustancia transparente que rellena el ojo. Los glóbulos algo distantes de la retina proyectan figuras grandes, demasiado borrosas tal vez para distinguirlas; los más cercanos crean figuras menores y mejor definidas. Muchos opinan que, con la edad, aumenta el número de moscas. La razón quizá sea que de la retina más vieja se desprendan más glóbulos. A mayor abundamiento la capa líquida próxima a la retina se desarrolla con los años.

Una de las peculiaridades de la figura de difracción debida a un objeto pequeño es que su centro puede ser luminoso. Para numerosos fenómenos ópticos la luz puede asimilarse indistintamente a rayos o bien a ondas. Pero en el caso de las moscas volantes la limitación es más rigurosa. En efecto, si la luz que pasa junto a un glóbulo se considerase un conjunto de rayos, aquél proyectaría una sombra oscura sobre la retina; ahora bien, puesto que el glóbulo es muy pequeño, la luz no se comporta como rayos sino como ondas, las cuales se difractan en todo el borde de la célula, enviando luz a lo que debería ser la zona oscura. En la retina la luz se interfiere, creando las franjas claras y oscuras que constituyen la imagen de una mosca volante. Una vez que la luz se haya cruzado con el glóbulo, podemos considerarla formada por rayos; pero en la retina sólo sirve el modelo ondulatorio.

Este proceso se representa en la página 116 para dos rayos luminosos que se cruzan con el glóbulo por lados opuestos. Los rayos se representan a la vez como rayos y como ondas en fase, es decir, sincronizadas. La luz se difracta alrededor del glóbulo y se esparce en la zona oscura. Los rayos llegan a la retina tras recorrer distancias iguales hasta el centro de la zona oscura. Entonces, al estar inicialmente en fase y recorrer distancias iguales, llegan también en fase, por lo que se interfieren constructivamente, e iluminan el centro de la zona oscura.

Un poco fuera del centro los rayos llegan en oposición de fase porque recorren distancias diferentes antes de alcanzar ese punto. Cuando la diferencia entre sus trayectos vale media longitud de onda, las ondas se interfieren destructivamente en la retina, dejando en oscuridad aquel punto. La simetría genera un anillo oscuro en torno al centro de la figura.

Algo más separada del centro hay una franja clara. En este caso, los rayos procedentes de los lados contrarios de la célula llegan aproximadamente en fase; se interfieren, pues, constructivamente. Más lejos del centro aparecen nuevas franjas claras y oscuras. Las moscas volantes se componen principalmente de la mancha central luminosa y la primera franja.

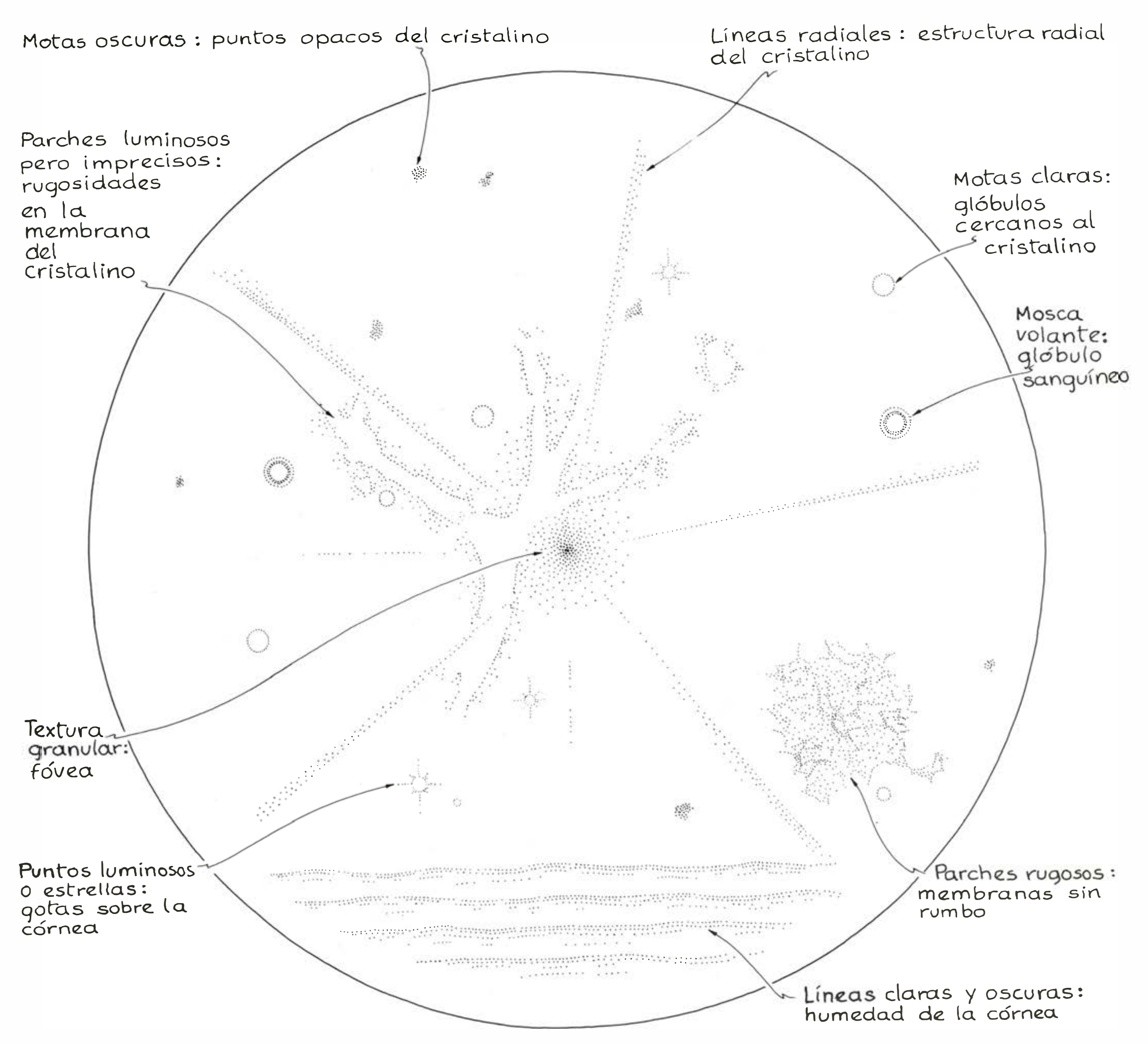
Y. P. Hwu, del Wytheville Community College, Virginia, ha conseguido una figura de difracción similar producida por glóbulos sanguíneos. Para ello dispuso sangre diluida sobre una platina que cubrió con un cubreobjetos de microscopio. Iluminó el conjunto con luz láser. Mediante un objetivo de microscopio (de 10 diámetros de aumento), situado delante mismo de la platina, abrió el haz de láser. Entonces, sobre una pantalla colocada a 50 centímetros de la platina, aparecieron las figuras de difracción debidas a los glóbulos sanguíneos.

Al inclinar la cabeza, las moscas de mi campo visual parecen moverse sin rumbo fijo. Este movimiento puede ser engañoso porque el sistema perceptivo da la vuelta a toda imagen que esté cabeza abajo en la retina. Si una mosca se mueve entonces, en virtud de la gravedad, hacia abajo al pasar frente a la retina, como el cerebro hace la misma interpretación, la mosca parecerá desplazarse hacia arriba.

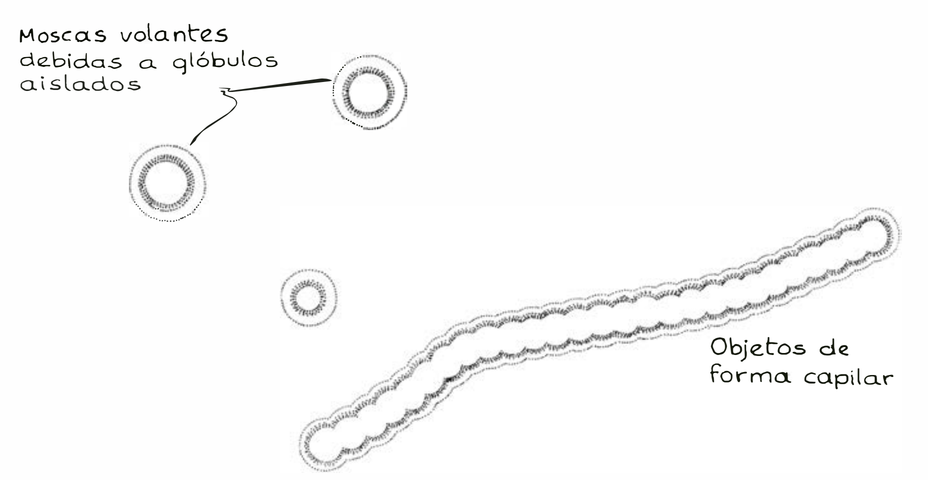
Inclinando la cabeza, o lanzando la vista repentinamente hacia abajo y luego hacia arriba consigo que las moscas se muevan. ¿Cuál es el efecto de ese movimiento de cabeza? Perturba el humor vítreo y la capa de líquido contiguo a la retina, con el consiguiente flujo de líquido que hará moverse a las moscas por delante de la retina. Si el movimiento real del líquido tiene lugar hacia arriba, las moscas aparentarán desplazarse hacia abajo.

White y Levatin investigaron la formación de moscas en un observador tumbado de espaldas con la mirada fija hacia arriba. En esa postura, las moscas se acercan a la retina, donde se posan en la depresión de la fóvea, acortándose la distancia entre cada glóbulo y la superficie sobre la que se forma su figura de difracción. Ello provoca la contracción de esta última, ya que depende de la diferencia entre los recorridos de los rayos luminosos.

Supongamos que la primera franja oscura se debe a rayos procedentes de bordes opuestos del glóbulo que recorren distancias que difieren en una semilongitud de onda. Si el glóbulo se acerca a la retina, tal condición la cumplirán puntos más próximos al centro de la figura; por eso, la franja oscura aparece más pequeña en el campo visual.



Algunos de los objetos que aparecen al contemplar un fondo monótono a través de un estenope



Aspectos característicos de las moscas volantes

Al ser más pequeñas las figuras, un observador tumbado detecta con mayor facilidad las correspondientes a glóbulos aislados, pues ganan nitidez y se hacen visibles más franjas. Puede ocurrir que algún glóbulo acabe acercándose tanto a la fóvea que la figura pierda definición, porque varias franjas vayan a dar sobre fotorreceptores contiguos.

Para contemplar las moscas volantes podemos valernos de un estenope mantenido delante de un ojo. El estenope no sólo impide que en el ojo penetre luz ambiental sino que posibilita aquellas condiciones para las cuales las figuras de difracción debidas a un glóbulo se observan con mayor precisión. Hasta aquí nos hemos basado en la hipótesis de que la luz que se cruza con el glóbulo se encuentra perfectamente en fase. No es ése el caso cuando la luz procede de un gran número de fuentes; mas si procede de un estenope, los rayos que se crucen con el glóbulo estarán casi en fase y, por tanto, la luz creará una figura de difracción más nítida.

El estenope puede construirse perforando con un alfiler un agujero diminuto en una hoja de papel de aluminio dispuesto sobre el extremo de un carrete de hilo. Siguiendo las indicaciones que les ofrecí aquí en enero pueden conseguirse estenopes más regulares y duraderos. Montados en pequeñas linternas los vende Edmund Scientific Co. (101 East Gloucester Pike, Barrington, N. J. 08007). Si el lector construye su propio estenope, necesitará al otro lado del mismo una fuente de luz difusa; como tal, sirve muy bien un visor de diapositivas manual, al igual que toda linterna pequeña. *No utilizar un láser*, pues, aunque es lo más idóneo para experiencias relacionadas con interferencias ópticas, puede perjudicar fácilmente a la retina. Efectivamente, su luz es de una coherencia tal (o sea, las ondas están casi exactamente en fase) que el haz puede disipar en una zona reducida de la retina energía suficiente para destruir los fotorreceptores, y ello sin producir dolor alguno.

El origen de las moscas volantes hay que buscarlo en los vasos sanguíneos de la retina, complicada red que se encuentra delante de los fotorreceptores. Podría suponerse que estos vasos deberían proyectar su sombra en el campo visual. Y así es, pero raramente nos apercibimos de ello: el sistema visual hace caso omiso de toda imagen inalterable transcurridos dos o tres segundos. La explicación admitida es que las imágenes inmutables fatigan al sistema, por cuyo motivo la percepción de aquéllas se desvanece. Si los objetos externos inmóviles se perciben es sólo porque los ojos se mueven constantemente a pequeñas sacudidas que impiden la formación de una imagen constante en la retina. Y como el sistema circulatorio está fijo en la retina, su sombra permanece constante; de ahí que no la percibamos.

En determinadas circunstancias podemos ver la red retiniana. Lo hará, por ejemplo, el lector que se despierte en una habitación iluminada por el sol y contemple con un solo ojo una pared lisa y desnuda o el techo. Distinguirá una tenue traza incolora de sus vasos retinianos, aunque sólo breves segundos. Luego, el sistema visual comenzará a ignorarlos y su visión se desvanecerá. Podrá verlos de nuevo si cierra un momento el ojo y torna a abrirlo; la red retiniana le parecerá un árbol que brote del "punto ciego", que es el punto de la retina por el que entran los vasos sanguíneos mayores.

Esta red suele conocerse con el nombre de árbol de Purkinje, en honor de Johannes Purkinje, quien la describió en 1823. Purkinje, adelantado de la óptica fisiológica, consiguió trazar un esbozo del sistema circulatorio de sus ojos valiéndose de una pequeña fuente luminosa. Lo mismo podemos hacer con un estenope, aunque quizá hayamos de tantear el tamaño del mismo para intensificar nuestra visión de la red.

Si dotamos al estenope de un movimiento circular lento delante de un ojo, mientras se mantiene cerrado el otro, la luz pasará por entre el sistema circulatorio del ojo iluminado bajo ángulos continuamente variables y, por tanto, la sombra de la red se desplazará por encima de fotorreceptores diferentes, con lo que su configuración permanecerá visible.

El manantial luminoso que situemos

Córnea
Lado sién
Coroides
Humor acuoso
Retina
Humor vítreo
Fóvea
Eje de fijación
Al punto de fijación
Glóbulos sanguíneos sin rumbo
Punto ciego
Cristalino
Iris
Nervio óptico al cerebro
Lado nariz

Ubicación de los glóbulos sanguíneos generadores de moscas volantes

del otro lado del estenope puede ser cualquier luz intensa y difusa. Sirve una pantalla de proyección de diapositivas corriente, convenientemente iluminada, e incluso un cielo despejado, siempre que de algún modo podamos resguardar el ojo para que sólo reciba luz a través del estenope.

William Oldendorf sugiere emplear una fuente puntual (una linternita de médico, por ejemplo) puesta suavemente en contacto con un párpado cerrado. Esta luz debe colocarse sobre el párpado superior cerrado y en la comisura externa del ojo, inmediatamente encima de la unión de ambos párpados. No hay que comprimir el ojo ni, por supuesto, tocar el globo ocular. La luz penetrará a través del párpado y proyectará en la retina una sombra del sistema circulatorio. Para que esa imagen no se quede quieta, y se desvanezca, la fuente puntual debe dotarse de un pequeño movimiento circular, cuya frecuencia se hará variar hasta conseguir la más clara visión del sistema.

En su libro *Visual Perception*, Tom M. Cornsweet afirma que, cuando la luz procede de fibras ópticas, llega a observarse una imagen nítida del sistema circulatorio. Fibras de este tipo pueden adquirirse de Edmund Scientific Co., junto con una pequeña fuente luminosa que se fijará a un extremo de un paquete de ellas. Este manantial luminoso da mejores resultados que la fuente luminosa puntual: las fibras, muy delgadas, arrojan sombras mejor definidas.

Señala, además, Cornsweet que la mejor visión de la red circulatoria retiniana se obtiene cuando la luz es fundamentalmente azul (con longitudes de onda de alrededor de 415 nanómetros). Para tales longitudes de onda, que se consiguen con un filtro azul, la hemoglobina de los glóbulos rojos de la sangre absorbe la luz. Entonces, si en ésta predominan las longitudes de onda azules, los vasos sanguíneos arrojarán sombras más nítidas. Edmund Scientific tiene a la venta filtros adecuados para estos propósitos.

La explicación clásica de la razón por la que el sistema circulatorio retiniano no sea normalmente visible no justifica la causa del desvanecimiento sensorial de un estímulo constante. Investigaciones recientes de A. E. Drysdale, de la Universidad de Reading, levantan la sospecha de que en la cuestión intervengan varios factores. En parte puede ser responsable la falta de contraste general de que adolecen las sombras. Otra causa del desvanecimiento podría residir en que la corteza visual fuese

asiento de algún mecanismo específico inhibidor de la percepción de la red.

En ocasiones, al fijar la vista en un fondo monótono, aprecio otro fenómeno endoóptico asociado a la red circulatoria retiniana: motas diminutas cruzan de un lado a otro de mi campo visual, cual si fueran dardos lanzados al azar, y luego desaparecen. Como en el caso de las moscas, no consigo enfocarlas. Lo cierto es que ninguna de ellas atraviesa mi campo visual por la región de la fóvea, caracterizada por su textura levemente granulosa.

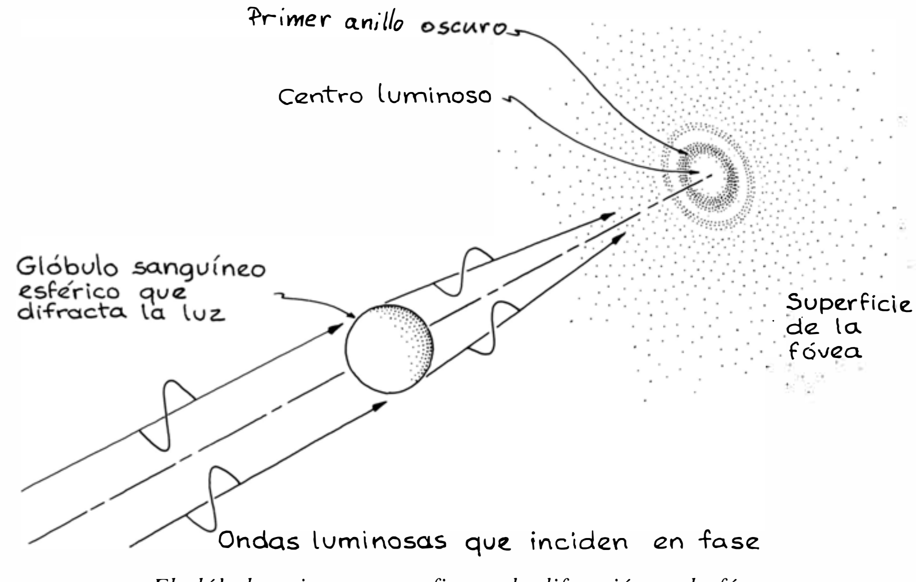
Sin embargo, al contemplar lo más fijamente posible algún objeto pequeño y alejado, las motas recorren una y otra vez los mismos trayectos. Pero no veo las motas siempre que miro al cielo. No entiendo qué pueda hacer yo que las ponga de manifiesto; posiblemente en ello influya, además de fijar la mirada, relajar los cristalinos de los ojos para enfocar al infinito.

Estas motas se deben a la circulación sanguínea por la retina. Si el lector se controla el pulso con cuidado a la vez que las observa, verá que su aparición sigue el ritmo de aquél. Su aspecto es luminoso, están dotadas de colas relativamente oscuras y se mueven siempre en fila india, sin que ninguna de ellas atrape nunca a otra. Su velocidad es variable. Se mueven más deprisa durante el sístole (contracción) de cada latido del corazón que durante el diástole (distensión). Existe la creencia de que se deben al flujo de glóbulos blancos por los vasos sanguíneos retinianos.

Tras realizar algún ejercicio físico, es posible que las motas se manifiesten de modo más acusado, ya que entonces el ritmo del pulso y la presión sanguínea son mayores. Doblando el espinazo repentinamente puede que se hagan más visibles, pues entonces se altera la presión sanguínea en los ojos. También cambia la visibilidad de las motas apretando ligeramente un párpado; aumenta así la presión sobre la retina y, por ende, la presión de la circulación retiniana. Basta una presión algo mayor sobre el ojo para que la presión en la retina haga que disminuya el flujo sanguíneo, casi eliminando las motas. (Si alguien lo ensaya, quizá vea también las figuras luminosas llamadas fosfenos, que les describí en julio del año pasado y que constituyen un fenómeno endoóptico totalmente diferente.)

Como mejor veo yo las motas es contra un cielo despejado, limpio de perturbaciones, cuya luz azul favorece la aparición del efecto. Condiciones similares pueden reproducirse al mirar hacia un fondo monótono luminoso a través de un filtro azul. ¿Por qué esos filtros? Al dejar pasar sólo las longitudes de onda en torno a los 415 nanómetros, la luz es absorbida por la hemoglobina de los glóbulos rojos, pero no por los glóbulos blancos, por lo que el movimiento de éstos resaltará mucho más. Como las motas se deben a la circulación de la sangre por la retina, siguen los recorridos de la circulación (no lanzándose al azar, como en mi primera impresión). No cruzan motas por la zona de la fóvea porque carece de irrigación sanguínea.

Hay otro efecto endoóptico que se aprecia cuando nos fijamos en una hoja de papel blanco iluminada alternativamente a través de un filtro azul y otro amarillo. Tras un cambio de amarillo a azul, en torno al punto que ocupa la fóvea en el campo visual aparece un pequeño anillo oscuro, en cuyo interior hay un punto más oscuro. Estas estructuras no las percibe todo el mundo. Nadie las ve más allá de dos o tres segundos. Reciben el nombre de punto o mancha de Maxwell, en honor de James Clerk Maxwell, célebre por sus teorías acerca de la naturaleza y propagación de las ondas electromagnéticas. Filtros de otros colores también surten efecto, a condición de que uno de ellos deje pasar más luz azul que el otro. Si el filtro azul se sustituye por otro que deje pasar la luz violeta, el punto será rosa.

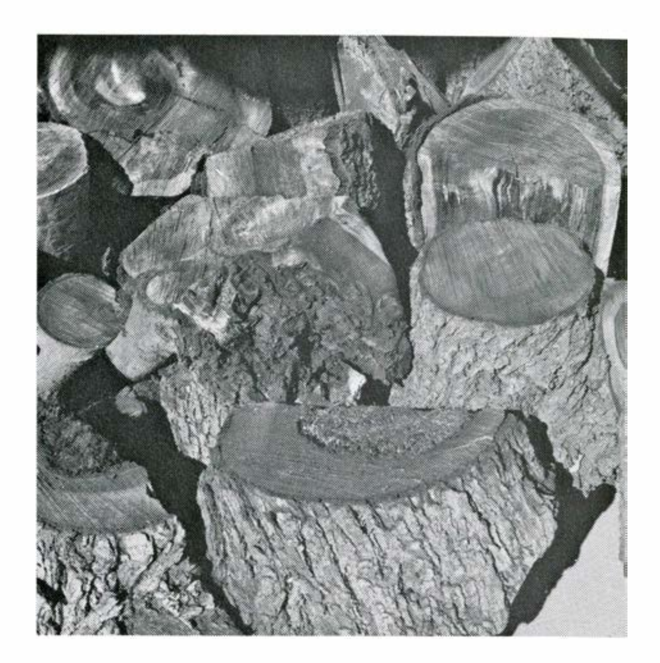


El glóbulo rojo crea una figura de difracción en la fóvea

Aunque el origen del punto de Maxwell es tema de discusión, parece deberse a la pigmentación de la mácula lútea, o mancha amarilla, que cubre toda la depresión que ocupa la fóvea. La ubicación de la mácula lútea no es precisa, pero en la depresión mencionada la mancha está más pigmentada. Las moléculas del pigmento absorben la gama de azules; así, cuando luz azul atraviesa la mácula camino de los fotorreceptores subyacentes, se absorbe. En los pocos segundos que necesita la vista para adaptarse a la luz azul, se presenta la mancha de Maxwell, para desaparecer después. Puede recuperarse brevemente adaptando el ojo a luz de otro color, antes de volver a exponerlo al azul.

Si el lector se dedica a observar fenómenos endoópticos con un estenope, es probable que vea un sinfín de estructuras distintas. Tras el parpadeo, brotan ante mí manchas brillantes en un entorno gris mal definido, por donde descienden poco a poco líneas claras y oscuras. Ambos efectos los causa el fluido transparente que en la córnea dejan los parpadeos. Este fluido (en gotitas o en película) refracta la luz que lo atraviesa. En una gota, la refracción concentra la luz hacia el punto medio de lo que sería la sombra geométrica de la misma; por ello, el centro de la mancha resplandece mientras que su perímetro se muestra bastante apagado. La película líquida irregular, al retroceder por la córnea tras un parpadeo, crea líneas de concentración de luz junto con otras más tenues.

Helmholtz describió algunas otras características endoópticas interesantes, pero no se entretuvo en interpretarlas. Pueden observarse pequeñas motas relativamente luminosas, semejantes a burbujas de aire. No es probable que se trate de las moscas volantes normales, pues parecen carecer de la configuración en círculos concéntricos que las caracteriza; podrían ser objetos situados en el medio comprendido entre la córnea y el cristalino.

Par estereoscópico "volteado" de Theodore C. Pickett

También pueden observarse líneas apagadas y oscuras que irradian desde el centro del campo visual, cuyo origen, según Helmholtz, podría encontrarse en la estructura radial del cristalino. Asimismo, pueden presentarse motas oscuras, producidas por pequeñas zonas opacas del cristalino. Los parches inmóviles dotados de pequeños tentáculos parecen deberse a arrugas de la membrana existente delante del cristalino; su estructura radial puede originarse cuando la membrana se separa de la córnea en las primeras fases del desarrollo fetal. A veces, veo como retazos arrugados que deambulan por mi campo visual; puede que sean trozos de membrana que vagan sin rumbo por el ojo, cual moscas volantes, pero desconozco su origen.

Christopher W. Tyler acaba de describir un nuevo fenómeno endoóptico. Al abrir los ojos por la mañana puede advertirse en el campo visual la presencia de una mancha peculiar, mucho más oscura que el resto del campo, o bien (lo que es más raro) más luminosa. Esta mancha subtiende un ángulo no superior a un grado aproximadamente dentro del campo visual; el lugar donde suele manifestarse, la mayoría de las veces, es cerca del centro del campo visual, pero no siempre en la zona de la fóvea. Puede desvanecerse de golpe para reaparecer después, sin causa justificada. A veces, esas manchas brotan a pares, otras en forma de círculos, alargadas, irregulares, etcétera. Generalmente son más precisas si no se mueven los ojos.

Estas manchas Tyler las llama microaneurismas sensoriales. Para alguien que haya sufrido un aneurisma fisiológico en la retina, su apariencia le resultará casi igual a la de éste. Un microaneurisma es un abultamiento de un vaso sanguíneo. Un médico que examine la retina lo verá como una minúscula mancha negra. Se desconoce la causa de esas manchas de origen sensorial.

Theodore C. Pickett, de Santa Fe, Nuevo México, me ha remitido un tipo de estereograma muy original. Del modo habitual sacó un par estereoscópico de una pila de leña. Pero luego montó las diapositivas al revés, aunque sin intercambiarlas de derecha a izquierda.

En las fotografías de esta página tenemos el resultado conseguido por Pickett. Si el lector es capaz de fijar la vista en las fotografías hasta fundir las imágenes separadas le será posible examinar el resultado sin estereoscopio. A mi me cuesta cierto esfuerzo. Trato de ajustar la convergencia de mis ojos como si estuviese mirando hacia algún objeto más lejano que las fotos y reajusto, después, el enfoque (esencialmente sin pensarlo) hasta que se solapan. (A cada lado del par solapado se encuentran imágenes secundarias, pero las paso por alto.) En cuanto las fotos superpuestas se deslizan una sobre la otra dentro de mi campo visual, se unen de golpe para ofrecer una imagen tridimensional.

Cuando en un estereoscopio se montan fotografías de la manera usual, el observador atribuye profundidad a los objetos que aparecen en ellas inspeccionando sus posiciones y tamaños relativos; se supone que analiza la profundidad cual si se hallara ante la escena original. Aquí puede que le ayuden su experiencia e indicios diversos de profundidad, pero la indicación decisiva parece ser la posición angular de los objetos vistos por cada ojo.

Tomemos dos objetos que se encuentren en el campo visual, uno de los cuales (llamado *A*) está más lejos que el otro (llamado *B*), aunque ninguno se halla especialmente lejano. Cuando los ojos miran hacia *A*, las visuales convergen en él formando cierto ángulo entre sí; cuando miran *B*, las visuales convergen en éste formando un ángulo mayor porque *B* está más cerca. Basándose en la diferencia entre ambos ángulos, el observador asigna profundidad a los dos objetos.

Cuando la escena se fotografía estereoscópicamente, entre una exposición y otra se cambia la posición de la cámara para reproducir la separación entre los ojos. Las fotos se colocan luego en un estereoscopio, el cual facilita la fusión de las dos imágenes remedando así la escena original. Aunque las fotos sean representaciones planas de la escena, las vistas levemente diferentes de los mismos objetos hacen que el observador les atribuya profundidad, al igual que antes. Y, al igual que antes también, las visuales que parten de los ojos hacia el objeto aparente *A* forman un ángulo menor que las visuales que van de los ojos al objeto aparente *B*; por tanto, el observador atribuirá mayor profundidad a *A*.

Numerosos investigadores han expe-

rimentado con el intercambio entre los fotogramas derecho e izquierdo, lo que da por resultado una inversión de profundidad, de tal modo que los objetos que en la realidad están distantes parecen estar cercanos, y viceversa. El artilugio de Pickett juega una pasada parecida al observador. En este caso, en cada fotograma los objetos pasan de derecha a izquierda y al revés. Entonces, las visuales que convergen en los objetos aparentes *A* y *B* lo hacen ahora formando un ángulo en *A* mayor que en *B*, con el resultado de que se interpreta que el objeto más lejano en la realidad se encuentra relativamente cerca, y el que está realmente más cerca parece estar alejado.

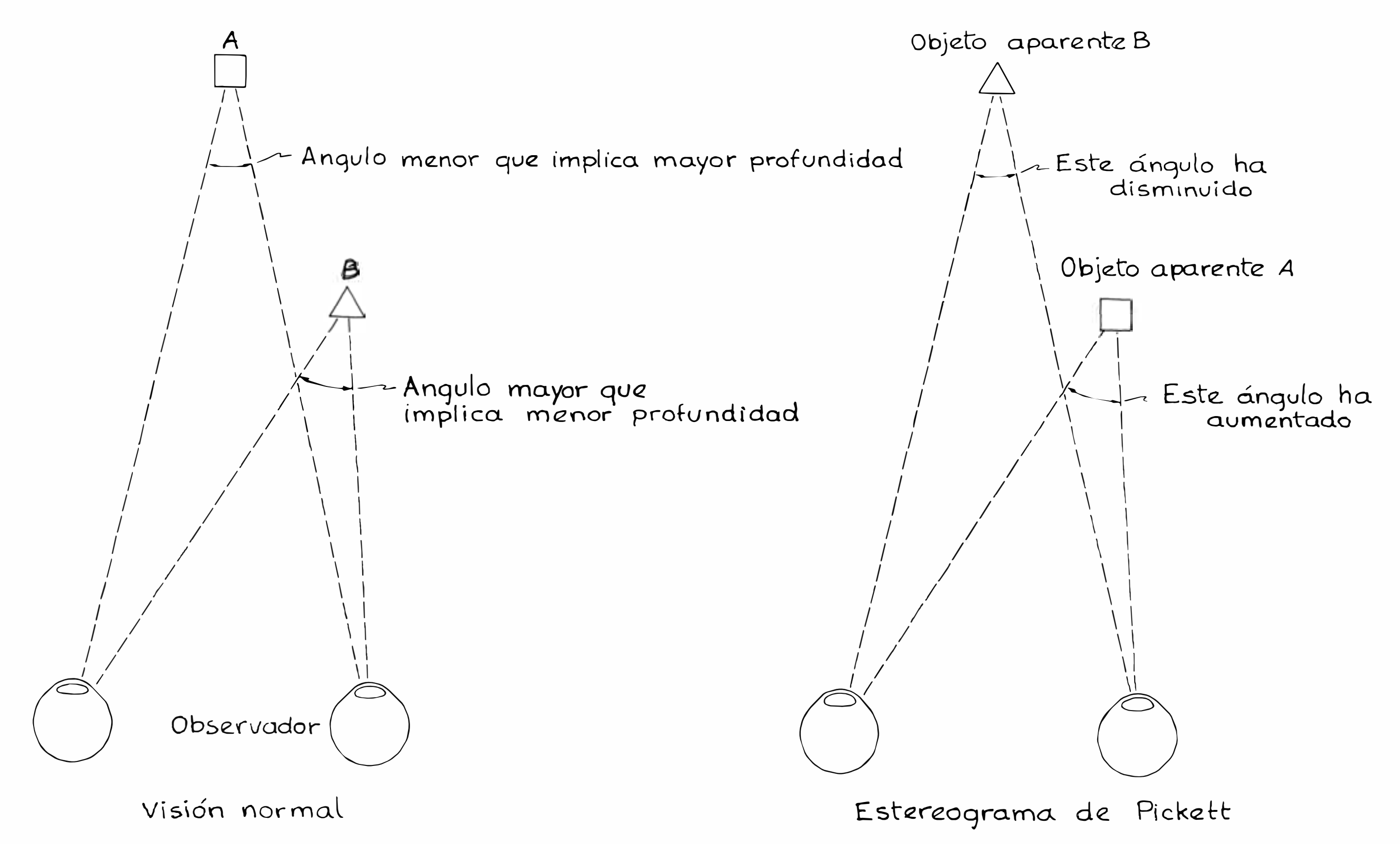
Las fotografías tomadas y montadas según las indicaciones de Pickett pueden crear una visión del mundo incomprensible. Parte de la extrañeza que causan procede del conflicto entre la experiencia del observador y lo que éste ve. La profundidad se asigna no sólo de acuerdo con los ángulos aparentes de los objetos, sino también de acuerdo con las imágenes de la retina. Cuando se miran dos objetos iguales, uno de los cuales está más cerca del observador que el otro, la profundidad se define sin mayor problema porque el objeto más distante crea en la retina una imagen más pequeña. Pero cuando se observa un par estereoscópico en el montaje de Pickett, ese dato entra en conflicto con el más convincente ofrecido por el examen de los ángulos. Habitualmente es éste el que prevalece, pero la discrepancia entre ambos crea al observador una visión extraña y desconcertante.

En la visión normal predomina la atribución de profundidad en función de los ángulos hasta que los objetos se hallan muy distantes (a 450 metros, por ejemplo). A partir de ahí, lo que determina la profundidad a atribuir es la experiencia, o bien los tamaños relativos de las imágenes retinianas. Los objetos alejados más de unos 450 metros los percibe el observador como si se encontraran en una superficie plana situada a esa distancia, más o menos.

Entre los fotogramas, sobremanera desconcertantes, de Pickett hay objetos cercanos y lejanos. Cuando un par estereoscópico que contenga objetos tales se contemple con la disposición inversa de Pickett, los objetos distantes ya no parecerán inscritos todos en una superficie relativamente plana y alejada, sino que aparentarán estar más cerca y con profundidades muy dispares. Por su lado, los objetos realmente cercanos quedarán relegados a la superficie plana alejada y con diferencias entre sus profundidades mucho menos acusadas.

A quien desee hacer experiencias con los métodos de Pickett, le aconsejo que tome escenas la profundidad de cuyos objetos varíe entre límites muy amplios. Algo muy adecuado puede ser un valle con árboles tanto próximos como lejanos. No obstante, para hacer esas fotografías deberán tomarse ciertas medidas. La separación entre las posiciones de la cámara se incrementará en unos tres metros por cada kilómetro de distancia hasta el objeto más lejano captado en los fotogramas. De las eventuales fotos se excluirá todo lo que se halle a menos del 25 por ciento de aquella distancia máxima. Por último, se hará lo necesario para que en el centro de cada fotograma del par estereoscópico aparezca algún objeto distante.

En mi artículo de enero les describí el método de fotografía "antiestenoscópica" ideado por Adam Lloyd Cohen. Resulta que las ideas en que se basa la antiestenopetografía fueron desarrolladas por primera vez, y de manera totalmente independiente, por Ronald Cowart, de la Universidad de Texas, en su tesis doctoral "la cámara oscura inversa". Tras investigaciones y trabajos posteriores, a cargo de Alfonso Zermeno, James M. Hevesi y Lee M. Marsh, el aparato se patentó en 1978. La patente es propiedad de la Universidad de Texas y todos los derechos de ésta están concedidos a Texas Medical Instruments, Inc.



Explicación de por qué un par estereoscópico volteado origina una imagen desconcertante

Libros

Kuhn y Garin sobre la ciencia de ayer y dos libros sobre la ciencia del mañana

C. Solís, J. Samsó, R. Margalef y J. F. Pascual-Sánchez

La Revolución Copernicana, por Thomas Samuel Kuhn. Ed. Ariel; Barcelona, 1981. El contenido de este primer libro de Kuhn se puede describir a grandes rasgos con cierta rapidez, dado que posee una estructura transparente, divisible en tres partes. Siendo su objeto la revolución de Copérnico, la *primera parte* (capítulos 1-4) expone los antecedentes precopernicanos de dicha revolución, tanto en el terreno astronómico profesional (caps. 1 y 2), como en el filosófico, cosmológico y social, en la antigüedad (cap. 3) y en la Edad Media (cap. 4); la *segunda parte* (cap. 5) da cuenta de la innovación astronómica de Copérnico en el seno de una cosmología en gran medida todavía aristotélica, aunque afectada de valores neoplatónicos, y la *tercera parte* (caps. 6 y 7), la más sumaria, precipitada y peor articulada de todas, a modo de epílogo excesivamente omniabarcante, se ocupa del desarrollo de la astronomía después de Copérnico (cap. 6) y apunta las transformaciones físicas, filosóficas y de todo orden que el copernicanismo contribuyó a desencadenar: la llamada revolución científica (cap. 7). El libro se cierra con un apéndice técnico, claro y bien hecho, sobre la solución clásica a algunos problemas astronómicos básicos, y con una bibliografía esencial comentada.

El objetivo de esta obra, cuya originalidad era sin duda más aparente en 1957 que en la actualidad, gracias en gran medida a los esfuerzos del propio Kuhn, seguidos luego por los de otros historiadores y filósofos post-positivistas como Hanson, es presentar una nueva manera de hacer historia de la ciencia, apadrinada por J. Conant. Huyendo por igual de las historias puramente internalistas, "técnicas", y de los vastos frescos más o menos anbiguamente filosóficos, Kuhn pretende combinar en dosis adecuadas la tradición de la historia de la ciencia con la de la historia de las ideas, a fin de que se iluminen ambas mutuamente en lugar de mezclarse en un mero esquema de yuxtaposición.

A la vista de tal objetivo, difícilmente podría ser más afortunada la elección de la revolución copernicana, dado el cúmulo de líneas que se entrecruzan en ella: el fin de la astronomía ptolemaica y el comienzo del camino que lleva a la astronomía elíptica; el socavamiento del aristotelismo y el inicio del progreso hacia la mecánica newtoniana; el final de la ciencia antigua y el comienzo de la revolución científica con sus concomitancias filosóficas, religiosas, políticas y sociales. Nada mejor se hubiera podido encontrar para propagar la misión de Conant consistente en atenuar o salvar la brecha existente entre las "dos culturas", científica y humanista, gestada precisamente en el epicentro de la época estudiada.

De acuerdo con ello, la primera parte de la obra constituye una inteligente exposición combinada de cuestiones *internas* de astronomía técnica, magistralmente divulgadas, junto con el marco *externo* en el que se plantearon, que incluye temas tanto de carácter social (necesidades de calendario) como de carácter intelectual (las restricciones cosmológicas a las soluciones técnicas permitidas). Asimismo, la evolución histórica de la sociedad en que se insertan las comunidades científicas contribuye decisivamente a hacer comprensible el contexto intelectual en que Copérnico se plantea de nuevo el viejo problema matemático de los planetas (irresuelto desde el siglo IV AC), ayudando a ver desde dentro la razón de ser de la innovación radical de Copérnico; esto es, explicando por qué se ponen ahora en entredicho ciertas restricciones físicas (y no matemáticas) inatacables durante trece siglos.

Sólo después de haber aclarado de este modo el contexto histórico de la obra de Copérnico, se puede calibrar adecuadamente el carácter y alcance de su revolución, cosa que se aborda, como señalaba, en la segunda parte. Queda en ella patente la índole paradójica del *De Revolutionibus*, partícipe a la vez de dos tradiciones, la que contribuye a superar y la que ayuda a crear, mezcla de fidelidad a normas matemáticas clásicas (mayor aún que la mostrada por Ptolomeo) y de innovaciones cosmológicas mínimamente indispensables, aunque filosóficamente articuladas de manera desmañada. De otra parte, el triunfo del copernicanismo se ve de manera distinta si se contempla desde la tradición de la filosofía natural o de la astronomía profesional, en la que la aceptación es relativamente rápida y poco traumática (frente a lo que ocurre en aquélla), si bien incluso aquí la alta estimación de las ventajas cualitativas de la solución copernicana al problema de las segundas desigualdades planetarias, frente a la escasa o nula economía que en comparación a la astronomía ptolemaica entraña desde la perspectiva de precisión, obliga a recurrir una vez más a factores externos de carácter intelectual. Entre ellos destaca fundamentalmente el neoplatonismo de las armonías cósmicas que haría saltar al primer plano, por encima de la precisión técnica, el carácter de sistema, conexión entre las partes, orden, tamaño y frecuencia de retrogradaciones, dependencias funcionales que el *De Revolutionibus* exhibe por vez primera. De ahí que los más notorios procopernicanos fuesen o cosmólogos y filósofos naturales, como Galileo, o astrónomos fuertemente neoplatónicos, como Kepler.

La mayoría de los lectores españoles habrán leído o leerán esta obra después de la otra más conocida del autor, *La estructura de las revoluciones científicas* (1962), viéndose tentados a proyectar sobre aquélla los conceptos historiográficos acuñados en esta última. Sin embargo, no aparecen por ningún lado los posteriormente manoseados conceptos de "paradigma", "crisis", "comunidad científica", "ciencia normal" y "revolucionaria", "rompecabezas", "anomalías", "conversiones" y "dependencia teórica" de la observación. Incluso se puede detectar en alguna parte un residuo de popperianismo ingenuo (pp. 112-113; apenas mitigado por el reconocimiento del carácter escurridizo de las relaciones entre teoría y observación) que afecta a algo tan central como las revoluciones científicas, concebidas aún sobre el modelo de conjeturas y refutaciones instantáneas ("una sola observación incompatible con su teoría demuestra que ha venido utilizando una teoría falsa").

No obstante, si no los conceptos, al menos sí están aquí las comunidades científicas y los paradigmas, las anomalías, las crisis y las revoluciones. Según señaló posteriormente Kuhn, lo que primero descubrió fue la existencia de

discontinuidades en la ciencia, las revoluciones, y sólo al preguntarse posteriormente qué pasaba entre dos rupturas tales se encontró con la ciencia normal regida por ejemplares. Si ello es así, asistimos en este libro a la génesis de esos descubrimientos (desarrollados entre 1957 y 1962), y en la tensión latente de los conceptos kuhnianos presionando por irrumpir en escena, a la manera en que al comienzo del cuarto movimiento de la novena de Beethoven sentimos el anhelo de prorrumpir en palabras del himno de Schiller, podemos observar, por una vez al menos, que la historia de la ciencia profesionalmente bien hecha ha sido de notable fecundidad para la filosofía de la ciencia.

La edición española no está demasiado cuidada, a pesar de haber conocido ya una reimpresión. Tras una rápida ojeada no minuciosa pude localizar varias omisiones del texto original, una de las cuales afecta a una cita bibliográfica (p. 363). Se sigue escribiendo mal la tercera ley de Kepler (p. 282) y persisten erratas como las de hablar de la "división de Descartes", cuando presuntamente debería decir "visión", confundir a Heráclito con Heráclides (p. 74) o el universo finito con el infinito (p. 210). Asimismo, la omisión de corchetes para las observaciones del traductor provoca la imagen chusca de un Kuhn citando al Padre Fray Custodio (p. 361).

En cuanto a la traducción, aceptable por lo demás, adolece de serias y continuas inelegancias, como un uso excesivo e inusual en español de la pasiva, leísmos sin cuento, usos atípicos de preposiciones, sintaxis por momentos errática e innumerables barbarismos del tipo "*es* con justicia *que* se aplica...", en lugar sencillamente de "con justicia se aplica...". Aparecen también reiteradamente las inevitables lacras del traductor bisoño: "evidencia", "relevante" y "énfasis" por *evidence, relevant* y *emphasis* (que podrían traducirse propiamente como "elementos de juicio", "pruebas", "testimonios"; "pertinente"; "hincapié", etcétera). Aparecen meteduras de pata más pintorescas en sitios como la p. 335, en la que se traduce en términos bancarios el sistema de *regulaciones* y *controles* previsto por la Constitución de los Estados Unidos (*Checks and balances* = cheques y saldos). Hay muchos otros errores menos vistosos que afectan al contenido del libro, como es el decir (p. 104) que muchos sistemas pre-copernicanos utilizan "una docena de epiciclos o más", cuando en realidad usan de seis a doce, o hablar de la excentricidad (*wobble*) de movimientos que no son en absoluto excéntricos (p. 108). Otros errores parecen indicar que el traductor no entiende el texto que presuntamente traduce, ya que significan contradicciones o errores graves, como el de la p. 271, donde no se da cuenta de que una nova no puede moverse *a través de* las estrellas, sino que debe hacerlo *con* ellas; o como en la p. 289, donde cree que el sistema ptolemaico predice que Venus ha de estar siempre en fase creciente; o, finalmente, como en la p. 239, donde se hace decir a Copérnico que Marte en oposición aparece a la vez muy grande y muy pequeño, como Júpiter y como una estrella de segunda magnitud.

Esto último, junto con las malas versiones dadas frecuentemente del *De Caelo* o la *Física* (el "lugar" de la teoría aristotélica se traduce en la p. 141 como "la ubicación") no menos que del *De Revolutionibus*, incita a pensar que quizá no se esté traduciendo en absoluto ni del original ni del inglés, sino del francés o vaya usted a saber de dónde.

Es de agradecer el esfuerzo del traductor por suministrar las referencias de las traducciones castellanas de las obras mencionadas por Kuhn, si bien interpreta la *chemical history of a candle* de Faraday como "la química de la luz". En unas ocasiones se inmiscuye excesivamente en el texto, regalándonos con sus propios comentarios y recomendaciones bibliográficas (pp. 362-3) y, en otras, omite traducciones pertinentes (no relevantes), como las del *Diálogo* de Galileo, la *Optica* de Newton, *La Lucha* de A. D. White o, teniendo en cuenta la fecha de reimpresión, los *Estudios* de Koyré. Vale más leer la edición de Harvard (C. S.)

LA REVOLUCIÓN CULTURAL DEL RENACIMIENTO y EL ZODIACO DE LA VIDA, por Eugenio Garin: Crítica y Península, respectivamente; Barcelona, 1981. En fechas muy recientes, tres editoriales españolas se han decidido a publicar traducciones de tres obras importantes de Eugenio Garin (nacido en 1909 y jubilado en 1979 tras haber sido profesor de historia de la filosofía en la Universidad de Florencia y en la Escuela Normal Superior de Pisa), sin duda el máximo especialista italiano en la historia cultural del Renacimiento. Reseño aquí los dos primeros títulos aparecidos en castellano, a los que hay que añadir *Del Medioevo al Renacimiento*, que acaba de editar Taurus y en el que aparecen algunos trabajos que forman parte también de *La revolución cultural del Renacimiento.* Estas repeticiones se explican debido a que este último libro es una compilación de estudios diversos publicados por Garin en libros (*Del Medioevo al Renacimiento* es uno de ellos) o publicaciones colectivas aparecidos entre 1967 y 1976 y que han sido reunidos aquí por el editor español: no existe, por consiguiente, en la producción original italiana de Garin ningún volumen que tenga un título análogo al de *La revolución cultural*, obra que, por otra parte, tiene una indudable unidad, va precedida de un valioso análisis de la producción bibliográfica de Garin, debido a Miguel Angel Granada (págs. 7-28), y lleva un índice onomástico final que facilita su lectura. Carácter muy distinto tiene *El Zodiaco de la Vida. La polémica astrológica del Trescientos al Quinientos*, libro que fue publicado con el mismo título (*Zodiacus vitae* es el de un poema latino en hexámetros editado por el misterioso Marcello Palingenio Stellato entre 1534 y 1537) por Garin en 1976 y que contiene el texto anotado de cuatro conferencias pronunciadas por el autor en el Collège de France en 1975.

El estudio de Miguel Angel Granada que aparece al frente de *La revolución cultural* me exime aquí la necesidad de presentar a una figura tan conocida como la de Garin. Me limito, pues, a señalar que, si bien su punto de partida es el de un historiador de la filosofía y este origen se manifiesta claramente, por ejemplo, en su insistencia en considerar el Humanismo como una filosofía (*Rev. cult.* págs. 14-15), también es cierto que Garin ha realizado un serio esfuerzo para integrar la historia de la filosofía y la historia de la ciencia en una historia general de la cultura (*Rev. cult.* pág. 18) y este esfuerzo constituye la columna vertebral de las dos publicaciones que analizo aquí. Se trata, sin duda, de dos libros que pueden desilusionar a historiadores de la filosofía y a historiadores de la ciencia ya que trascienden los contenidos propios de ambas disciplinas y pueden producir una impresión de aparente superficialidad. Son, no obstante, dos colecciones de estudios de un gran maestro que abren perspectivas nuevas o son el resultado de una vida entera dedicada a la erudición: ni el historiador de la filosofía ni el de la ciencia pueden prescindir de ellos.

Con óptica de historiador de la ciencia destacaré aquí algunos puntos sobresalientes en los dos libros de Garin. El primero de ellos se refiere al análisis de la contraposición Edad Media-Renacimiento, tema al que se dedica un capítulo específico (*Rev. cult.* págs. 31-71) en el que Garin señala que fueron los hombres del Renacimiento los que empezaron a caracterizar la Edad Media como una época de tinieblas frente a la luz dimanada por la época en la que

vivían, en la que surge una conciencia de novedad incrementada por las conquistas técnicas (imprenta), los descubrimientos geográficos y la revolución copernicana. Esta sensación de ruptura con los siglos pasados se inicia, según Garin, en el siglo XIV y se cierra en el siglo XVIII: poco después, el Romanticismo renovaría totalmente nuestra visión de la Edad Media. En este apartado conviene señalar de modo especial que, para Garin, esta idea de la existencia de grandes ciclos históricos y la conciencia que la humanidad adquiere de un *re-nacimiento* se origina en la doctrina de las grandes conjunciones astrológicas que, como veremos, adquiere gran difusión en esta época. Este tipo de astrología mundial es uno de los aspectos a través de los cuales Garin muestra la existencia de indudables conexiones entre Edad Media y Renacimiento. Obviamente este segundo período histórico no supone un abandono de las conquistas científicas del anterior. Es significativo que, en la segunda mitad del siglo XV, un Pico della Mirandola no estudie sólo griego sino también árabe y hebreo y se rodee de colaboradores judíos como Elia del Medigo, Guillermo Raimundo de Moncada y Jochannan Alemanno los cuales traducen obras de autores árabes como Averroes y hebreos como Maimónides y Gersónides, además de textos cabalísticos. Garin señala que Pico y sus colaboradores despertaron la curiosidad de la época por las fuentes "orientales" (*Rev. cult.* págs. 165-168). Podría relacionarse esta actitud de Pico con la famosa carta enviada, según Rabelais, por Gargantúa a su hijo Pantagruel en la que le recomienda el estudio del griego y del latín, pero también el del hebreo, caldeo (= arameo) y árabe. De hecho, si bien en el contexto rabelesiano hay que pensar que está aconsejando el estudio de las lenguas de la Biblia (en el siglo XVI algunos salterios daban el texto en hebreo, griego, latín, caldeo y árabe), no deben olvidarse los trabajos recientes realizados en España por Luis García Ballester quien ha puesto de relieve la figura de un Nicolás Clénard, humanista discípulo de Erasmo, que llega a España en 1530 con la finalidad de aprender árabe y recomienda la utilización de las versiones árabes de Galeno con el fin de elaborar un texto crítico de la obra del médico griego. Esta idea de Clénard no se ha llevado a la práctica hasta el siglo XX y se basa en la constatación obvia de que los traductores árabes del siglo IX dispusieron de manuscritos griegos mucho más antiguos que los que nos resultan accesibles hoy en día o se encontraban al alcance de los humanistas del Renacimiento.

Sin necesidad de seguir con el *excursus* anterior, y sin adelantar tampoco ideas acerca de la influencia de la astrología y de la magia medievales en el Renacimiento, conviene recordar que Garin llama la atención sobre los ecos que muchos científicos medievales despertaron en los hombres del Renacimiento (esta tarea fue iniciada hace muchos años por Sarton): por ejemplo, el mismo Pico della Mirandola lee en Padua a Aristóteles y a sus comentaristas griegos, árabes y latinos (*Rev. cult.* pág. 171), estudia a Platón, Plotino, Proclo pero también a Avicena (*Rev. cult.* pág. 191); una serie de códices de las bibliotecas Laurenciana y Nacional de Florencia contienen un elenco de clásicos de la ciencia griega y medieval que formaban parte de la biblioteca del notario florentino Filippo Pieruzzi (s. XV) (*Rev. cult.* pág. 100), etc. De hecho estos frecuentes ecos plantean el problema de la concepción misma del Humanismo en sus relaciones con la ciencia así como el de los orígenes de la revolución científica. Este es el tema del capítulo *Los humanistas y la ciencia* (*Rev. cult.* págs. 245-270), en el que Garin rechaza la concepción tradicional según la cual el Humanismo habría sido la causa de la relativa decadencia científica del siglo XV y de la primera mitad del siglo XVI. Por otra parte aparece aquí el tema de "la rebelión de los medievalistas": los avances espectaculares realizados por la historia de la ciencia medieval en este siglo (a través de la obra, por ejemplo, de Duhem, Anneliese Maier, Thorndike y, más recientemente, Crombie y Clagett) han puesto de relieve que ciertas ideas que se creían propias de los siglos XVI y XVII tenían antecedentes claros en la Edad Media. La exageración de este hecho real y una cierta tendencia a la "precursitis" han llevado a los autores citados, según Garin, a postular una absoluta continuidad entre Edad Media y Renacimiento y a afirmar que la obra de Leonardo da Vinci, Descartes y Galileo se apoya en la de los científicos medievales y no en la labor de los humanistas. Para Garin la nueva ciencia nace de la ruptura con el aristotelismo y del aprovechamiento de la labor filológica de los humanistas así como de la utilización del trabajo mecánico de los artesanos (*Rev. cult.* págs. 252-253). Asimismo "la reivindicación de los *filósofos más antiguos*, de Platón, así como el uso de la obra de Arquímedes, son adquisiciones indudables de los humanistas" (*Rev. cult.* págs. 256-257), y finalmente, la nueva ciencia se basa en "la lectura de los antiguos y la experiencia directa" (*Rev. cult.* pág. 259). Afirmaciones tan categóricas requieren una cierta matización: hay ruptura con el aristotelismo pero Aristóteles sigue presente ya que, sin él, ciertos aspectos de la obra de Copérnico son incomprensibles; Platón adquiere un carácter relevante, así como el neoplatonismo, pero debe recordarse también que los aspectos más progresistas de la física medieval eran de cuño neoplatónico; por otra parte no es justo considerar el uso de *toda* la obra de Arquímedes como una adquisición de los humanistas tras la aparición de la importantísima obra de Marshall Clagett titulada *Archimedes in the Middle Ages* (1964 y ss.); por último, por más que Garin quiera corregir las exageraciones en que han incurrido los medievalistas, no puede olvidarse la labor de los científicos medievales a la hora de elaborar la lista de factores que confluyen en la aparición de la nueva ciencia.

Un último aspecto a subrayar es el del interés que los hombres del Renacimiento sintieron por la magia y la astrología, tema al que Garin dedica un capítulo en *La revolución cultural* (*Magia y astrología en la cultura del Renacimiento*, págs. 199-216) y la totalidad de *El Zodiaco de la vida*. El análisis que Garin realiza de la polémica antiastrológica hace aparecer verdades evidentes que, esta vez sí, marcan una continuidad absoluta con la Edad Media: no se produce en el Renacimiento una ruptura entre la astronomía moderna y la astrología medieval (*Zodiaco* pág. 27); frente a la opinión de Pingree, la astrología no supone un universo geocéntrico y finito (*Zodiaco* págs. 13-14); si Lutero, Savonarola y Pico adoptan una actitud antiastrológica, ello no se debe a una motivación científica sino religiosa (problema del libre albedrío) que ya había provocado las actitudes antiastrológicas medievales en pensadores cristianos, musulmanes y judíos; por otra parte no se trata de una actitud propia "de humanistas", sino que va dirigida "contra los humanistas", y resulta curiosísimo constatar que, frente a Pico, Pomponazzi defiende la astrología en nombre de la ciencia (*Zodiaco* págs. 24-25). Las actitudes antiastrológicas de ciertos hombres de ciencia (Galileo, Cavalieri) no dejan de estar teñidas de cierta ambigüedad (*Zodiaco* págs. 27-28, 30-31) y Kepler levanta horóscopos (en 1972 Vernet estudió los de Mahoma y Lutero) y realiza distinciones sibilinas entre ciertas técnicas astrológicas que acepta y otras que rechaza (*Zodiaco* págs. 29-30). El Renacimiento vuelve a poner de moda la as-

trología mundial de grandes conjunciones y se leen los clásicos de la materia (Albumasar, Mashallah y al-Kindi). Esta doctrina, de origen persa, fue desarrollada por los autores árabes antes citados y, para lo que aquí nos interesa, puede resumirse de la manera siguiente: los grandes acontecimientos históricos se producen cíclicamente como consecuencia de conjunciones de Júpiter y Saturno. Este último planeta recorre su órbita en unos treinta años y Júpiter en unos doce, razón por la cual ambos planetas tienen la misma longitud cada veinte años (conjunción menor). Cuando transcurren 240 años (12 conjunciones menores), tiene lugar un cambio de triplicidad (conjunción media): los astrólogos dividen los signos zodiacales en cuatro triplicidades que son *de fuego* (Aries, Leo, Sagitario), de *tierra* (Tauro, Virgo, Capricornio), de *aire* (Géminis, Libra, Acuario) y de *agua* (Cáncer, Scorpio, Piscis). En efecto: una conjunción menor tiene lugar en un punto de la elíptica situado 247,5° por delante del punto en el que se produjo la conjunción menor anterior. Al cabo de once conjunciones menores, la duodécima tendrá lugar en un signo zodiacal perteneciente a una triplicidad distinta de la del ciclo anterior y tendremos, entonces, una conjunción media. Finalmente, dado que las triplicidades son cuatro, cuando transcurren $4 \times 240 = 960$ años, la conjunción tendrá lugar en el mismo signo zodiacal y el mismo grado de la eclíptica que al comienzo de todo el proceso y tendremos entonces una conjunción mayor. Esta es la explicación de la misteriosa frase de Ibn Jaldún citada por Garin en *Revolución cultural* (pág. 40) y *Zodiaco* (págs. 44-45) y que no tiene mucho sentido fuera de su contexto.

A lo largo de la Edad Media coexisten una astrología matemática, como la astrología de las grandes conjunciones (que tiene la ventaja de incitar el desarrollo de los estudios de astronomía esférica y de fomentar el que los grandes mecenas subvencionen programas de investigación astronómica) con la denominada magia talismánica. Esta última no se limita a observar posiciones de los cuerpos celestes y predecir acontecimientos futuros, sino que pretende actuar sobre la naturaleza asociando astrología con magia. Garin parece sugerir que astrología y magia talismánica están estrechamente vinculadas en el Renacimiento cuando rechaza (*Zodiaco* págs. 10 y 20) cualquier distinción tajante entre astrología "religiosa" y astrología "científica". En este período histórico la magia talismánica está también de moda y deriva de dos fuentes básicas: por una parte el hermetismo cuyo *corpus* fundamental de textos es traducido al latín, en el siglo XV, por Marsilio Ficino (*Rev. cult.* págs. 142-143; *Zodiaco* págs. 94 y ss.); por otra el *Picatrix*, escrito en el siglo XI por un autor hispanoárabe, objeto de una versión castellana perdida realizada en 1256 por orden de Alfonso X y de la que deriva una traducción latina que se difunde ampliamente en el Renacimiento (*Zodiaco* págs. 53-84). Dentro de este contexto el análisis de Garin pone de relieve un aspecto sorprendente de la magia renacentista: la magia es la ciencia de los experimentos (recuérdese que Thorndike tituló su gran obra *A History of Magic and Experimental Science*). En el plano de la razón, la experiencia carece de sentido pues es sustituida por una rigurosa cadena de silogismos (recuérdese también que, según Koyré, buena parte de los experimentos galileanos eran puramente mentales) y, por ello, la experiencia se refugia en el terreno de lo irracional (*Rev. Cult.* pág. 207). Por otra parte ciertos autores renacentistas parecen iniciar un programa que tiende a interpretar racionalmente la magia. Es el caso de Campanella quien afirma que "mientras no se comprende el arte, dícese siempre ser obra de magia; después, se convierte en ciencia vulgar" (*Rev. cult.* pág. 199). Del mismo modo Giordano Bruno define el mago como un sabio que sabe actuar (*Rev. cult.* págs. 200-201). El programa campanelliano es desarrollado por autores renacentistas como Cardano, Della Porta, Agrippa, Paracelso y otros (*Rev. cult.* págs. 200-201) y esta actitud puede fácilmente apoyarse en la tradición medieval: un curiosísimo pasaje del *Picatrix* predice grandes milagros técnicos para el futuro entre los que se encuentran el arrasar a distancia las ciudades y naves enemigas y hacer que vuelen los barcos por el cielo (*Zodiaco* págs. 80-81). Del mismo modo Picco della Mirandola identifica la "magia natural" con la técnica (*Zodiaco* págs. 124-125) y Pietro Pomponazzi, al polemizar con Pico, intenta dar explicaciones naturales a fenómenos mágicos con unos razonamientos que tienen un carácter sorprendentemente moderno (*Zodiaco* págs. 137-140).

Lo expuesto hasta aquí basta como muestra de la riqueza de estos dos libros. Podría extenderme más y aludir, por ejemplo, a los dos capítulos finales de *La Revolución cultural* (*La revolución copernicana y el mito solar* y *Galileo y la cultura de su época*) que inciden directamente en la historia de la ciencia. Prefiero, no obstante, que sea el lector quien tenga el placer de descubrirlos. (J. S.)

CULTURAL TRANSMISSION AND EVOLUTION: A QUANTITATIVE APPROACH, por L. L. Cavalli-Sforza y M. W. Feldman. Princeton University Press; Princeton, 388 págs., 1981. El interés por la eterna cuestión de lo que es más importante, si "natura" o "cultura", no decae. La carga emocional propia del tema enturbia casi siempre las pretensiones de presentar un debate relativamente objetivo, o aceptable por una mayoría de personas razonables. Se dice que todas las comparaciones son odiosas, lo que no es óbice para que todo el mundo siga haciéndolas, y yo debo decir que este libro me ha gustado bastante más que otros, también recientes, que cubren un territorio científico y cultural aproximadamente coincidente. Este libro, sensato y modesto, trata de manera prudentísima los temas más candentes, con lo que sin duda contribuirá positivamente a colocar toda la problemática de las relaciones entre la genética y la cultura dentro del área de la ciencia normal.

Los autores distinguen diferentes formas de evolución: 1) La evolución darwiniana de caracteres genéticos, algunos de los cuales pueden estar en la base de formas de comportamiento; 2) la evolución de rasgos culturales, que pueden ser adaptativos o no, según las condiciones, mas para los que se puede aceptar que están sometidos a una selección natural y a una evolución; 3) la transmisión de modas, costumbres y hábitos, unos inofensivos, como peinados y vestidos, otros de carácter más dudoso, como ciertas bebidas y otros aún ciertamente nocivos, como las drogas, que utilizan mecanismos de transmisión que representan un contagio horizontal, a veces pasajero; 4) la evolución de lo que llama organismos secundarios, como automóviles y otros ingenios, que manifiestan evolución propia, que puede ser de tipo darwiniano (automóviles más eficaces y económicos) o de otro tipo por contagio y no directa o evidentemente útil (aletas, cromados). El lenguaje ofrece magníficos ejemplos de evolución de una creación y un instrumento cultural, con muchas semejanzas con la evolución de las especies y la biogeografía, que resultan fascinantes para el biólogo. La tendencia a fijar y codificar disimula, artificiosamente, la gran variedad local del lenguaje que es condición necesaria a toda evolución. Se encuentran relaciones entre distancia lingüística y distancia geográfica; pero existen, además, cambios rápidos y otros aparentemente dis-

continuos, debidos a conquistas e imposiciones políticas. El estudio de la distribución de los apellidos, un tema del que Cavalli-Sforza se ocupó anteriormente, ofrece la ocasión de nuevas consideraciones interesantes.

El libro contiene una introducción (76 páginas) y un epílogo (27 páginas) que encierran la sustancia del tema. El resto del texto se dedica a la presentación razonada de modelos matemáticos. Los autores consideran necesaria la aproximación cuantitativa y expresan la opinión de que la teoría es indispensable para el desarrollo de cualquier disciplina científica. La mayor debilidad del libro es probablemente la dificultad que entraña cuantificar los "caracteres culturales". El tratamiento matemático, relativamente sencillo, se desarrolla en cuatro capítulos que tratan, respectivamente, de la transmisión vertical (53 páginas) o de padres a hijos, de la transmisión oblicua y horizontal (89 páginas), representada por las relaciones con tíos y maestros y las que se establecen dentro de una misma generación, de los caracteres que representan estados múltiples y discontinuos (48 páginas) y de la transmisión cultural de caracteres continuos (riqueza, tamaño con que se construyen ciertos artefactos), donde la noción de deriva, en una tradición, puede estudiarse mejor (73 páginas). Los autores prometen un segundo volumen para abordar las diferencias hereditarias individuales en lo referente a la capacidad de aprender, tema mucho más polémico.

Los distintos modelos que se proponen se ensayan generalmente utilizando datos procedentes de un colectivo pequeño de estudiantes, sin más propósito que el mostrar cómo pueden funcionar dichos modelos. Utilizan características culturales como religión, asistencia a prácticas religiosas, gusto por la música o por ciertos deportes y espectáculos, preferencias alimentarias, incluyendo el uso de la sal, opiniones políticas, etcétera. Las distintas hipótesis (contribución paterna o materna, por ejemplo) se comparan con algunas observaciones. Los autores reconocen la dificultad extrema de deslindar caracteres discontinuos, que han sido la base del desarrollo de la genética, de manera que no se pueden construir modelos exactamente superponibles a los de dicha ciencia. Es punto menos que imposible cuantificar los caracteres culturales más importantes, y toda la aparatosa expresión matemática no deja de ser muy provisional y exploratoria. Resulta también muy difícil evaluar los posibles efectos de la selección natural sobre los equilibrios que se alcanzan en cada caso. La estratificación social puede reforzar correlaciones dentro de cada familia.

Si la plasticidad aparece como una de las características de la cultura, frente a la relativa inamovilidad de los caracteres genéticos, el problema básico es difícilmente soluble en términos de pautas derivadas de las de esta ciencia. Sin embargo, del intento surgen sugerencias importantes. Aparecen con frecuencia discontinuidades en la distribución de caracteres culturales a lo largo de ciertas fronteras, originadas por la oposición o rechazo entre grupos humanos en contacto. Creo que esto puede ser indicio de cierta tendencia, común a muchos sistemas, a quedar fuera de equilibrio, por lo menos en las zonas de fricción, lo que podría ser muy importante en la dinámica cultural; pero no profundizan ni se ocupan de este aspecto.

Este libro constituye una nueva muestra de la actividad creadora de uno de los autores, cuyas contribuciones a la genética humana han sido complementadas siempre por un gran interés por los aspectos culturales. La obra ilumina un campo muy vasto, con nuevas ideas y posibles direcciones de trabajo. Dada la excelencia de esta contribución, dentro de una disciplina que se augura muy fértil, cuando se superen algunos tabúes que todavía lleva adhe-

ridos, desearíamos que se pudiera disponer de una versión española del texto de Cavalli-Sforza y Feldman. (R. M.)

DIFFERENTIAL GEOMETRICAL METHODS IN MATHEMATICAL PHYSICS. Dirigido por P. L. García, A. Pérez-Rendón y J. M. Souriau. Lecture Notes in Mathematics, vol. 836; Springer-Verlag, 1980. Se recogen aquí las actas de las comunicaciones presentadas a dos rondas de reuniones sobre temas afines celebradas en septiembre de 1979. La primera, el Coloquio Internacional del CNRS, tuvo lugar en Aix-en-Provence (Francia) del 3 al 7. La segunda, la Conferencia Internacional de Métodos de Geometría Diferencial en Física Matemática, se desarrolló en Salamanca del 10 al 14.

Era la primera vez que una conferencia internacional sobre geometría diferencial en física matemática tenía por sede España. Lo que hay que agradecérselo a los profesores Pedro L. García y Antonio Pérez-Rendón, que así facilitaron la asistencia de un gran número de físicos y matemáticos hispanos.

Por la proximidad en el tiempo y por la afinidad de sus exposiciones hubo participantes comunes en ambas. El número de asistentes al coloquio celebrado en Francia fue de unos 70 y en torno a 110 los investigadores que participaron en la reunión salmantina. Naturalmente, predominaron los franceses en la primera y, los españoles, en la segunda. El resto de los científicos asistentes provenían de Estados Unidos, Alemania, Italia, Canadá, Israel, Polonia, Bélgica, Holanda, Portugal y de algunos países sudamericanos. Exceptuando a los polacos, se echaba en falta la representación científica de los países del este europeo, los soviéticos en especial. Estas conferencias se inauguraron hace ya varios años. Desde entonces siguen un camino itinerante que ha recorrido Bonn, Varsovia, Aix-en-Provence, Salamanca, Clausthal e Israel en este año de 1982.

Los temas fundamentales que se trataron en las celebradas en 1979, objeto de esta reseña, fueron: teoría gauge, gravedad, supersimetría y supergravedad, formulación simpléctica de la mecánica clásica y de las teorías clásicas de campos y cuantificación geométrica. Todos ellos, temas de gran interés para la física teórica y matemática, en los que se utilizan los métodos que proporciona la geometría diferencial. Cada expositor dispuso de 45 minutos para su relación. El libro recoge la versión escrita y extendida de la mayoría de ellas. Versión ampliada porque, en estos 45 minutos, la mayoría de las veces sólo se podía avanzar un resumen de lo que posteriormente ha aparecido impreso en este libro, que, en algunos casos, refleja también el trabajo de los autores en meses posteriores a las ponencias.

Comencemos por la teoría gauge, o las teorías de Weyl-Yang-Mills-Shaw (WYMS) como se las llama en honor de sus iniciadores. Teoría gauge (término que puede traducirse por medida) es un apelativo corrientemente aceptado y quizá poco afortunado para denominar a las teorías mediante las cuales no sólo se pretende describir todas y cada una de las interacciones que aparecen en la naturaleza, sino también unificarlas en una superteoría.

De las cuatro interacciones físicas fundamentales, tres, el electromagnetismo, la fuerza débil y la fuerte se describen mediante teorías gauge. Del electromagnetismo da cuenta el tipo de teoría gauge más sencilla, la de tipo abeliano. En efecto, al carecer de carga eléctronica el fotón, que es la partícula que media en la interacción, las ecuaciones de Maxwell son lineales. La teoría así formulada y cuantificada recibe el nombre de electrodinámica cuántica (QED, en su abreviatura inglesa). Disponemos de una teoría gauge de la interacción fuerte, no abeliana (no conmutativa) y, por tanto, más complicada: las ecuaciones son no lineales; es-

ta teoría, cuantificada, recibe la denominación de cromodinámica cuántica (QCD, en su abreviatura inglesa).

La teoría gauge da cuenta no sólo de esas interacciones por separado, sino también de su unificación. A finales de los años sesenta, surgió así la teoría que unificaba la interacción electromagnética con la débil, incorporando el mecanismo de ruptura espontánea de simetría o de simetría oculta, que no es necesario en QED o en QCD, ya que las partículas intermediarias carecen en estos casos de masa.

Las teorías gauge cubren todas las interacciones, menos la gravitatoria, en los distintos modelos que se acogen bajo la así llamada gran unificación (GUT), o teoría electronuclear.

¿Qué ocurre con la gravedad? Aunque intuitivamente es una teoría del tipo gauge, no se posee todavía una teoría clásica definitiva de ella. Los artículos de Pérez-Rendón, Kijowski (proponiendo éste una teoría puramente afín), Jadczyk y en parte el de Kopczynski que aparecen en el libro están dedicados a este problema, cuya resolución abriría el camino a una posterior teoría de gravedad cuántica.

Finalmente, con la idea gauge cabe aproximarse al sueño dorado de muchos físicos-matemáticos: la unificación de todos los campos en una única interacción, intentos que en la jerga física reciben el nombre de superunificación (SuperGut, Susy). Tal pretenden las teorías de supersimetría y supergravedad. Sobre éstas, el libro contiene tres artículos de dos de sus iniciadores, Deser y Ferrara. Se recoge también un intento de mejorar la teoría de unificación débil-electromagnética mediante el recurso a las técnicas de supergravedad; lo firman Ne'eman y Thierrig-Mieg.

Desde un punto de vista más geómetra-diferencial se abordan problemas de índole estructural. Bott estudia los puntos críticos inestables de un funcional, para obtener más información acerca de la topología de los mínimos absolutos de un determinado problema variacional; Moncrief expone la reducción de las ecuaciones de Yang-Mills cuando se las considera un sistema hamiltoniano con ligaduras; P. L. García describe la estructura tangente, es decir, la variedad de soluciones de las ecuaciones del tipo Yang-Mills usando resultados propios y de teoría de Hodge asi como del formalismo general del problema variacional desarrollado por él y Pérez-Rendón; Carmeli y Moroz se ocupan de la clasificación de campos gauge, problema que ha sido reducido a la aplicación de un teorema matemático muy general y que "se había olvidado" en la abundante literatura física al respecto.

Finaliza el apartado de teoría gauge con varias contribuciones que utilizan el lenguaje de fibrados, el más apropiado en la teoría de Yang-Mills. Kerner estudia la definición de spinores en fibrados. Kopczynski generaliza la teoría de Kaluza-Klein en un intento de unificar todas las interacciones y no sólo el electromagnetismo con la gravedad. Pérez-Rendón utiliza la técnica de fibrados para explicar y sistematizar desde un punto de vista general la literatura "física" sobre la teoría gauge de gravedad, basada en la deformación del grupo de transformaciones de la relatividad especial (el grupo de Poincaré).

Entre los artículos de la parte dedicada a la formulación simpléctica de la mecánica racional y de las teorías clásicas de campos destaca el de Kijowski, sobre una nueva formulación simpléctica de estas teorías, que es el resumen de un libro ya publicado por Springer-Verlag en la colección "Lectures Notes in Physics", vol. 107. Resaltaríamos también los de Tulczjew y Benenti, sobre el método de Hamilton-Jacobi, y el de Horváthy, que estudia la incidencia de la topología del espacio en la formulación de los problemas variacionales clásico y cuántico. El formalismo simpléctico se introdujo para describir los campos clásico, sin cuantificar, como sistemas hamiltonianos y obtener así la teoría cuántica de forma canónica.

En el apartado que recoge las comunicaciones sobre cuantificación geométrica, vale la pena leer el trabajo de Simms sobre el significado geométrico de cuantificar "a la Feynman", el de Lichnerowicz sobre una nueva forma de cuantificación, deformando el álgebra de Lie dada por los corchetes de Poisson, y el de Segal sobre teoría de estabilidad y cuantificación.

De lo anteriormente reseñado cabe deducir que este libro debería no sólo estar en las bibliotecas de todos los departamentos de matemáticas y de física teórica de nuestras universidades, sino que cualquier graduado, estudiante de doctorado o profesor, de física o de matemática, debería tenerlo como obra de consulta al menos. Me gustaría cerrar esta reseña recordando que estas conferencias se celebraron en el año del centenario del nacimiento de Einstein, uno de los grandes científicos que, con Gauss, Riemann, Hamilton, Weyl, Minkowski, Yang y otros pensaron y piensan que la naturaleza no sólo se describe en lenguaje matemático, Galileo dixit, sino que ese lenguaje es fundamentalmente geométrico (J. P.-S.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

PLATAFORMAS PETROLIFERAS MARINAS

OUTER CONTINENTAL SHELF FRONTIER TECHNOLOGY: PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM. Marine Board, Assembly of Engineers. National Research Council, National Academy of Sciences, 1980.

TETHERED BUOYANT PLATFORM PRODUCTION SYSTEM. Graham Perrett y Robert M. Webb en *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, vol. 4, págs. 261-274; 1980.

RECENT ADVANCES IN DESIGN AND CONSTRUCTION OF DEEPWATER CAPABILITY. Griff C. Lee en *Ocean Industry*, págs. 71-80; noviembre, 1980.

INTRODUCTION TO OFFSHORE STRUCTURES. W. J. Graff. Gulf Publishing Company, 1981.

ALIMENTOS QUE MODIFICAN LA FUNCION CEREBRAL

RELEASE OF ACETYLCHOLINE FROM THE VASCULAR PERFUSED RAT PHRENIC NERVE-HEMIDIAPHRAGM. George C. Bierkamper y Alan M. Goldberg en *Brain Research*, vol. 202, n.º 1, págs. 234-237; 24 de noviembre de 1980.

PRECURSOR CONTROL OF NEUROTRANSMITTER SYNTHESIS. R. J. Wurtman, F. Hefti y E. Melamed en *Pharmacological Reviews*, vol. 32, n.º 4, págs. 315-335; diciembre, 1980.

ALZHEIMER'S DISEASE: A REPORT OF PROGRESS IN RESEARCH. Dirigido por S. Corkin, K. J. Davis, J. H. Growdon, E. Usdin y R. J. Wurtman. Raven Press, 1981.

CARBOHYDRATE CRAVING IN OBESE PEOPLE: SUPPRESSION BY TREATMENTS MISSION. Judith J. Wurtman, Richard J. Wurtman, John H. Growdon, Peter Henry, Anne Lipscomb y Steven H. Zeisel en *International Journal of Eating Disorders*, vol. 1, n.º 1, págs. 2-15; otoño, 1981.

LA ZONA SISMICA DEL MISSISSIPPI

THE MISSISSIPPI VALLEY EARTHQUARKES OF 1811 AND 1812: INTENSITIES, GROUND MOTION AND MAGNITUDES. Otto W. Nuttli en *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 63, n.º 1, págs. 227-248; 1973.

THE NEW MADRID EARTHQUARKES OF 1811-1812. James Penick, Jr. University of Missouri Press, 1976.

RECURRENT INTRAPLATE TECTONISM IN THE NEW MADRID SEISMIC ZONE. M. D. Zoback, R. M. Hamilton, A. J. Crone, D. P. Russ, F. A. McKeown y S. R. Brockman en *Science*, vol. 209, n.º 4460, págs. 971-976; 29 de agosto de 1980.

INVESTIGATIONS OF THE NEW MADRID, MISSOURI, EARTHQUARKE REGION. Dirigido por F. A. McKeown y L. C. Pakiser. *U.S. Geological Survey Professional Paper 1236*, 1981.

COMPLEJOS GIGANTES DE NUBES MOLECULARES EN LA GALAXIA

GIANT MOLECULAR CLOUDS IN THE GALAXY. Dirigido por P. M. Solomon y M. G. Edmunds. Pergamon Press, Inc., 1980.

INTERSTELLAR MOLECULES. Dirigido por B. H. Andrew. D. Reidel Publishing Company, 1980.

THE MILKY WAY. Bart J. Bok y Priscilla Bok. Harvard University Press, 1981.

EL CALAMAR GIGANTE

A REVIEW OF THE SYSTEMATICS AND ECOLOGY OF OCEANIC SQUIDS. M. R. Clarke en *Advances in Marine Biology*, vol. 4, págs. 93-300; 1966.

A SPECIMEN OF THE GIANT SQUID *ARCHITEUTHIS* FROM NEW ZEALAND. R. K. Dell en *Records of the Dominion Museum in Zoology*, vol. 7, n.º 4, págs. 25-36; 1970.

FIRST RECORD OF JUVENILE GIANT SQUID, *ARCHITEUTHIS* (CEPHALOPODA, OEGOPSIDA). C. F. E. Roper y R. E. Young en *Proceedings of the Biological Society of Washington*, vol. 85, n.º 16, págs. 205-222; 1972.

GIANT SQUIDS. K. N. Nesis en *Gidrobiologiia*, vol. 6, n.º 706, págs. 55-60; 1974.

MONOPOLOS MAGNETICOS SUPERPESADOS

MAGNETIC MONOPOLES. Kenneth W. Ford en *Scientific American*, vol. 209, n.º 6, págs. 122-131; diciembre, 1963.

CONSTRAINTS ON CONTROVERSY: THE CASE OF THE MAGNETIC MONOPOLE. Andrew Pickering en *Social Studies of Science*, vol. 11, n.º 1, págs. 63-93; febrero, 1981.

CROMATINA Y ENSAMBLAJE DEL VIRUS SV 40

THE MOLECULAR BIOLOGY OF TUMOR VIRUSES. J. Tooze. Cold Spring Harbor Laboratory, Cold Spring Harbor; Nueva York, 1974.

THE CHEMICAL BASIS OF VIRUS STRUCTURE, DISSOCIATION AND REASSEMBLY. J. M. Kaper en *Frontiers of Biology*, vol. 39. North-Holland Publishing Company; 1975.

CHROMATIN. Reseña de Gary Felsenfeld en *Nature*, vol. 271, págs. 115-122; 12 de enero de 1978.

COMPREHENSIVE VIROLOGY. Dirigido por Heinz Fraenkel-Conrat y Robert R. Wagner, vols. 3, 9 y 13. Plenum Press; Nueva York & Londres, 1979.

RESTRICTION ENDONUCLEASES, SIMIAN VIRUS 40, AND THE NEW GENETICS. Daniel Nathans en *Science*, vol. 206, págs. 903-909; 23 de noviembre de 1979.

LA BREVE VIDA DE ÉVARISTE GALOIS

ÉVARISTE GALOIS. René Taton en *Dictionary of Scientific Biography*, dirigido por Charles Coulston Gillispie. Charles Scribner's Sons, 1972.

GENIUS AND BIOGRAPHERS: THE FICTIONALIZATION OF ÉVARISTE GALOIS. Tony Rothman en *The American Mathematical Monthly*, vol. 89, n.º 2, págs. 84-106; febrero, 1982.

TEMAS METAMAGICOS

THE CHOPIN COMPANION. Dirigido por Alan Walker. The Norton Library, 1966.

CHOPIN: THE MAN AND HIS MUSIC. James Huneker. Dover Publications, Inc., 1966.

CHOPIN. George R. Marek y Maria Gordon-Smith. Harper & Row Publishers Inc., 1978.

TALLER Y LABORATORIO

ENTOPTIC IMAGES AND RELATED PHENOMENA. G. S. Brindley en *Physiology of the Retina and Visual Pathway*. The Williams & Wilkins Company, 1970.

THE VISIBILITY OF RETINAL BLOOD VESSELS. A. E. Drysdale en *Vision Research*, vol. 15, n.º 7, págs. 813-818; julio, 1975.